

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electromécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par

- **DERRADJ AIMENE**
- **CHELBAB SAAD**

Intitulé

Refroidissement des composants électroniques

Soutenu le :

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
Dr. AISSA OUALID	MCA	Président	Univ-BBA
Dr .BENNIA ABDEREZAK	MCA	Encadreur	Univ-BBA
Dr. REFFAS ABDERRAHIM	MCA	Examineur	Univ-BBA
Dr .ZAOUI FARES	MCB	Examineur	Univ-BBA

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin. Nous tenons à remercier notre encadreur Dr. BENNIA Abderazak, pour nous avoir offert les conditions favorables et pour nous avoir parfaitement guidé tout le long de la réalisation de ce travail. Nous avons particulièrement apprécié ses encouragements, ses conseils qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Je remercie mes parents, qui se sont sacrifiés pour mon bien être et ma famille qui m'a encouragé à reprendre les études.

Nous remercions toute personne mes 'ayant aidé de près ou de loin à l'achèvement de ce travail, spécialement tous les enseignants du département d'électromécanique de l'université de bordj Bou Arreridj.

Enfin une pensée amicale à tous mes collègues et mes proches amis pour les moments que nous avons partagés ensemble durant ces années de formation.

DEDICACES

Nous dédions ce mémoire à toutes mes familles, tous mes proches et mes amis...

Résumé

Dans ce travail, on a présenté une étude numérique sur le refroidissement des composants électroniques. L'objectif visé de ce présent travail est de trouver numériquement le fluide de travail (fluide convective) qui assure une bonne évacuation de la chaleur et par conséquent un meilleur refroidissement du composant électronique. Les équations qui régissent cette étude ont été résolues par une approche numérique, basée sur la méthode des volumes finis, en utilisant le code de calcul Fluent et le meilleur Gambit. Un premier travail de validation a été mené en comparant notre travail avec ceux d'autres travaux contenus dans la littérature. Par la suite, on a fait varier le fluide de travail dans le but de trouver le meilleur fluide de travail qui assure une bonne évacuation de la chaleur et par conséquent un bon refroidissement du composant électronique.

Mots clés : Simulation numérique, convection naturelle, cavité, flux de chaleur. Composants électroniques

ملخص

في هذا العمل قدمنا دراسة عددية عن تبريد المكونات الإلكترونية. الهدف من هذا العمل الحالي هو إيجاد سائل العمل (سائل الحمل الحراري) عددياً و الذي يضمن تبريداً جيداً للحرارة و بالتالي تبريداً أفضل للمكونات الإلكترونية. تم حل المعادلات التي تحكم هذه الدراسة من خلال النهج العددي، بناءً على طريقة الحجم المحدود باستخدام كود Fluent. تم تنفيذ أول عمل تحقق من خلال مقارنة عملنا بعمل مؤلفين آخرين. بعد ذلك، تم تغيير سائل العمل من أجل العثور على أفضل مائع حمل حراري الذي يضمن تبريداً جيداً للحرارة و بالتالي تبريداً جيداً للمكون الإلكتروني.

الكلمات المفتاحية : محاكاة عددية ، حمل طبيعي ، تجويف ، تدفق حراري، مكون إلكتروني

Abstract

In this work we presented a numerical study on the cooling of electronic components. The objective of this present work is to find numerically the working fluid (convective fluid) which ensures a good evacuation of the heat and consequently a better cooling of the electronic component.

The equations governing this study were solved by a numerical approach, based on the finite volume method, using the fluent calculation code. A first validation work was carried out by comparing our work with those of other works contained in the literature. Subsequently the working fluid was varied in order to find the best working fluid was varied in order to find the

best working fluid which ensures good heat dissipation and therefore good cooling of the electronic component

Keywords: numerical simulation, natural convection, cavity, heat flow, electronic component



Sommaire

Introduction générale	2
I.1. Introduction.....	5
I-2- Importance de transfert thermique	5
I-3- Modes de transfert thermique.....	5
I-3-1 Conduction.....	6
I-3-2- Rayonnement	6
I-3-3-Convection.....	7
I-3-3-1- Convection naturel (libre).....	8
I-3-3-2-Convection forcée.....	9
I-3-4-Coefficient de transfert thermique.....	10
I-3-5-Domains d'applications de la convection naturelle :	11
I-3-6- Quelques techniques d'amélioration du transfert de chaleur :	11
I-3-6-1- Surfaces traitées :.....	11
I-3-6-2-Surfaces rugueuses :	12
I-3-6-3- Surfaces prolongées (ailettes) :.....	13
I-4-Systèmes de refroidissement des composants électroniques:	14
I-4-1-Composants électroniques:	14
I-4-2-Systèmes de refroidissement	15
□I-4-2-1-Refroidissement à l'air :	16
I-4-2-2-Refroidissement par liquide caloporteur :	17
I-4-2-3-Refroidissement diphasique (caloducs):.....	20
I-5-1- Huile minérale	21
I-5-2- Huiles végétales ou esters naturels	22
I-5-3- Huiles esters synthétique	22
I-7- Synthèse bibliographique :	23
I-8- Conclusion.....	26
II-1- Introduction :	27
II-2- Description du problème :.....	27
II-3- Hypothèses simplificatrices :	28
II-4- Equations du modèle mathématique :	28
II-4-1- Equations gouvernantes dimensionnelles :	28
II-4-1-a- Equation de continuité :.....	29
II -4-1-b- Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes).....	29

II-4-1-c- Equation de l'énergie :.....	30
II-4-2- Equations gouvernantes adimensionnelles.....	30
II-4-2- a : Nombre de Grashof :	31
II-4-2- b : Nombre de Rayleigh.....	32
II-4-2-c : Nombre de Prandtl.....	32
II-5- Conditions aux limites et initiales.....	33
II-6-Transfert de chaleur :.....	33
II-7- Conclusion	35
III-1- Introduction :.....	37
III-2- Optimisation du maillage	37
III-2-a- Maillage non raffiné (12500)	37
III-2-b- Maillage non raffiné (112500).....	38
III-2-c- Maillage raffiné (150000)	39
III-2-d- Maillage non raffiné (150000).....	40
III-2-e- Maillage non raffiné (244500)	41
III-3- Validation :	42
III-4-Influence du fluide :	44
III-4- 1-Huile silicone de référence.....	44
III-4-2- Huile minérale (fluide A).....	45
III-4-3- Huile silicone (fluide B).....	47
III-4-4-Huile silicone (fluide C).....	48
III-4-5- huile Ester synthétique (fluide D).....	49
III-4-6-Huile ester naturelle (fluide E).....	50
III-4-7-Huile ester naturelle (fluide F).....	51
III-5- Conclusion :	52
Conclusion générale.....	62
Référence bibliographique.....	62



Liste des figures

Figure I.1: Principe de la conduction thermique	6
Figure I. 2: Principe du rayonnement thermique	7
Figure I. 3: Schéma de transfert de chaleur par convection	8
Figure I. 4: Convection naturelle	9
Figure I. 5: Schéma de la convection forcée	10
Figure I. 6: Gradient de vitesse dans la couche limite	11
Figure I. 7: Exemples de surfaces traitées	12
Figure I. 8: Tubes avec rugosité structurée bi et tridimensionnelle.....	13
Figure I. 9: Système de refroidissement à air passif.....	13
Figure I. 10: Présentation type des composants électroniques	15
Figure I. 11: Système de refroidissement à air passif.....	16
Figure I. 12: Système de refroidissement forcé par air Radiateur et ventilateur	17
Figure I. 13: Schéma simplifié de refroidissement par liquide.....	18
Figure I. 14: Refroidissement liquide à plaque froide	18
Figure I. 15: Refroidissement liquide à micro-canaux	19
Figure I. 16: Refroidissement liquide à mini-canaux	20
Figure I. 17: Principe de fonctionnement d'un caloduc	21
Figure I. 18: Processus de raffinage pour les huiles brutes	22
Figure II. 1: Schéma de la configuration considérée	27
Figure III. 1:Maillage non raffiné de la cavité (12500).....	37
Figure III. 2: Champs de vitesse et de température pour le maillage (12500)	38
Figure III. 3: Maillage non raffiné de la cavité (112500).....	38
Figure III. 4: Champs de vitesse et de température pour le maillage (112500)	39
Figure III. 5: Maillage raffiné de la cavité (150000).....	39
Figure III. 6: Champs de vitesse et de température pour le maillage raffiné (150000).....	40
Figure III. 7: Maillage non raffiné de la cavité (150000).....	40
Figure III. 8: Champs de vitesse et de température pour le maillage non raffiné (150000).....	41
Figure III. 9: Maillage de la cavité (244500)	41
Figure III. 10: Champs de vitesse et de température pour le maillage non raffiné (144500).....	42
Figure III. 11: Comparaison des résultats pour $Pr = 212$ et $Ra = 1,95 \cdot 10^5$ (b), (d) présente étude. (a), (c) résultats de I, Ishihara et al.....	43
Figure III. 12: Champs de température pour l'huile silicone de référence. Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.....	44
Figure III. 13: Champs de vitesse pour l'huile silicone de référence. Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.....	45
Figure III. 14: Champs de température pour huile minérale (fluide A). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.....	46
Figure III. 15: Champs de vitesse pour huile minérale (fluide A). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K	46
Figure III. 16: Champs de température pour huile silicone (fluide B). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.....	47
Figure III. 17: Champs de vitesse pour huile silicone (Fluide B). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T=1$ K	47
Figure III.18: Champs de température pour huile silicone (Fluide C). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.....	48

Figure III. 19: Champs de vitesse pour huile silicone (Fluide C). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T=1K$	48
Figure III. 20: Champs de température pour huile ester synthétique (Fluide D). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1 K$	49
Figure III. 21: Champs de vitesse pour huile ester synthétique (Fluide D). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T =1K$	49
Figure III. 22: Champs de température pour huile ester naturelle (Fluide E). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1 K$	50
Figure III. 23: Champs de vitesse pour huile ester naturelle (Fluide E). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1 K$	50
Figure III. 24: Champs de température pour huile ester naturelle (Fluide F). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1 K$	51
Figure III. 25: Champs de vitesse pour huile ester naturelle (Fluide F). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm).....	51



Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1: Nombre de Nusselt et densité de flux totale pour différents fluides. Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.....	52
--	----



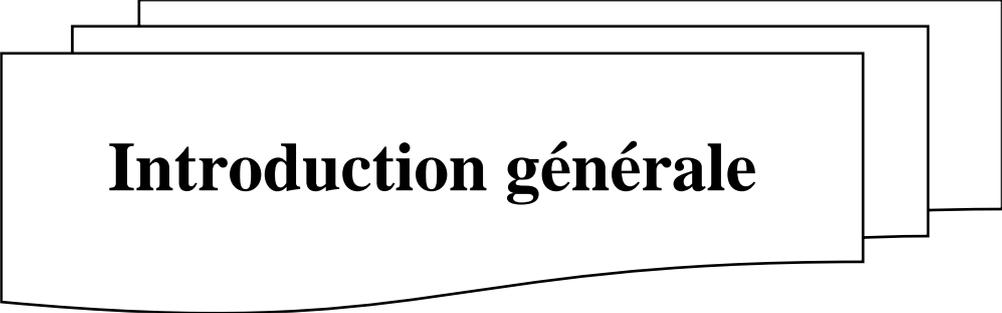
Nomenclature générale

Symbole

Symbole	Définition	Unité
Φ	La densité du flux de chaleur	[w]
H	Coefficient de transfert thermique	[w/m ² .k]
S	Surface d'une paroi	[m ²]
T _s	Température de la paroi chaude	[K]
T _f	Température de la paroi froide	[K]
U	Vitesse du fluide	[m/s]
ρ	La masse volumique	[Kg/m ³]
β	Coefficient de dilatation cubique du fluide	[k ⁻¹]
T ₀	Température de référence	[K]
c _p	Chaleur spécifique	[j/kg.k]
μ	Viscosité dynamique	[Pa.s]
H	Hauteur	[m]
L _c	Langueur vertical	[m]
P	La pression	[Pa]
g	L'accélération due à la gravite terrestre	[m/s ²]
ν	Viscosité cinématique	[m ² /s]
α	La diffusivité thermique	[m ² /s]
λ	Conductivité thermique	[w/m.k]
ΔT	Différence de température	[K]
θ	Température adimensionnelle	Sans unité
N	Nombre des nœuds	Sans unité

Nombres adimensionnels

Symbole	Nombre
Gr	Nombre de Grashof
Ra	Nombre de Rayleigh
Nu	Nombre de Nusselt locale
Pr	Nombre de Prandlt
pe	Nombre de Péclet



Introduction générale

Introduction générale

Le transfert de la chaleur est une science qui étudie la façon dont la chaleur se propage d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de température [2]. Il représente une partie très importante dans le domaine technologique et joue un rôle très important dans l'évolution de l'industrie dans le monde.

En distingue trois modes fondamentaux de transfert thermique à savoir : la conduction, la convection et le rayonnement.

De nos jours, les recherches dans ce domaine couvrent un large champ d'application puisque les études concernées sont variées. Au titre d'exemple : la thermique du bâtiment et le refroidissement des composant électroniques, ...etc.

Tous les composants électroniques sont sensibles à leur température : ils ont des caractéristiques médiocres en dehors de certaines limites de température et ils sont détruits si la chaleur dissipée dépasse largement ses limites [6]. Certains composants dissipent beaucoup de chaleur et s'échauffent et afin d'être dans les limites de fonctionnement de ces composants, il faut aménager l'écoulement de cette chaleur à l'extérieur. Le refroidissement des composants électroniques est l'un des principaux obstacles au développement des systèmes plus rapides, car l'indispensable extraction de chaleur dissipée (par les composants électroniques) doit être efficacité.

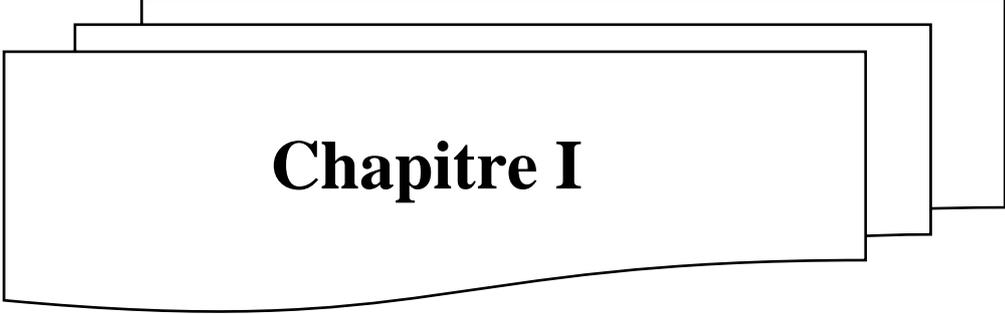
Ce mémoire présent une étude numérique sur le refroidissement des composants électronique. L'objectif visé de ce présent travail est de trouvé numériquement le fluide de travail (fluide convective) qui assure une bonne évacuation de la chaleur et par conséquent un meilleur refroidissement du composant électronique.

Pour atteindre nos objectifs, le présent mémoire est divisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation des généralités sur le transfert de chaleur et une recherche bibliographique sur le refroidissement des équipements électroniques par l'usage des huiles (minérales, végétales et synthétiques).

- La géométrie, la modélisation mathématique et physique du problème et la configuration considérée dans cette étude ainsi que les équations gouvernantes, les conditions initiales sont abordées au deuxième chapitre.
- Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats numériques, en incluant des comparaisons avec les résultats contenus dans la littérature et des interprétations des résultats obtenus.

Enfin, une conclusion générale qui résume les essentiels points de nos résultats.



Chapitre I

- **Généralité et recherches bibliographiques**

I.1. Introduction :

Les avancées et l'évolution technologiques récentes en électronique ont permis d'améliorer l'efficacité des composants qui deviennent de plus en plus performants et de plus en plus petits. Cela entraîne des contraintes de fonctionnement pour les composants particulièrement au niveau des seuils de températures. Les composants électroniques d'aujourd'hui peuvent produire plusieurs centaines de watts par centimètre carré. Pour cette raison, l'évacuation de la chaleur est devenue un des problèmes majeurs à résoudre avant la réalisation des composants [1], Pour cela, plusieurs études ont été entreprises afin de déterminer le moyen le plus approprié pour maintenir ces composants à une température acceptable de fonctionnement.

Nous présentons dans ce chapitre une étude descriptive des trois modes de transfert thermique. Puis nous exposons une synthèse bibliographique sur les différentes méthodes de refroidissement des composants électroniques par l'usage des huiles (minérales, végétales, synthétiques).

I-2- Importance de transfert thermique :

Le transfert de la chaleur est une science qui étudie la façon dont la chaleur se propage d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de température. Ce phénomène est très important dans les domaines des sciences technologiques et de l'industrie. C'est un processus complexe, qui peut avoir lieu en présence des différents modes fondamentaux, à savoir : la conduction, la convection et le rayonnement [2]. Dans le cas où l'un de ces trois modes déterminants, les effets des autres sont importants ; aussi ils peuvent être négligés, simplifiant considérablement l'analyse du cas concerné [3].

I-3- Modes de transfert thermique :

On distingue 3 modes de transmission de la chaleur :

I-3-1 Conduction :

La conduction est un mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu, ou entre deux milieux en contact, et se réalisant sans déplacement global de matière. L'énergie diffuse dans un milieu, la température augmente de proche en proche (par exemple, si une cuillère est dans un plat chaud et que sa queue dépasse dehors, la chaleur se transmet à la queue de la cuillère par conduction). Dans un gaz ou un liquide, l'énergie se propage par contact direct entre molécules sans déplacement notable de molécules [4].

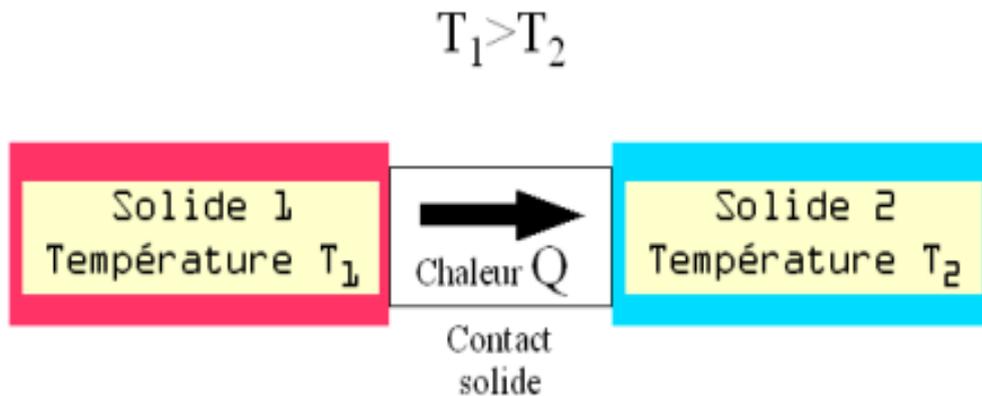


Figure I.1: Principe de la conduction thermique [5].

I-3-2- Rayonnement :

Le terme rayonnement est appliqué à l'ensemble des échanges d'énergie à distance entre les corps par des ondes électromagnétiques. Les échanges peuvent avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques [6].

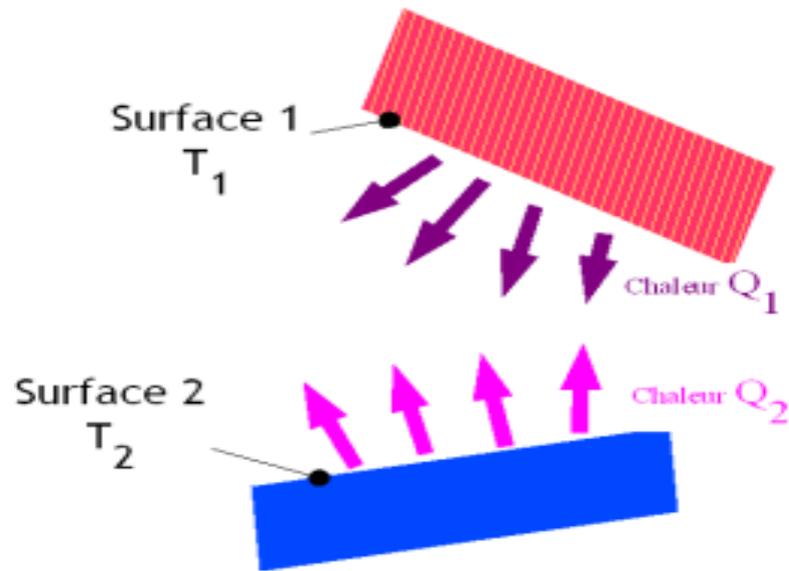


Figure I. 2: Principe du rayonnement thermique [7].

I-3-3-Convection :

La convection est le mécanisme le plus important de transfert de chaleur entre une surface solide et un liquide ou un gaz [2]. La convection caractérise la propagation de la chaleur dans un fluide (gaz ou liquide), dont les molécules sont en mouvement. La chaleur est transférée de manière beaucoup plus efficace que par la conduction thermique ou le rayonnement, qui sont les deux autres modes de transfert de chaleur [8].



Figure I. 3: Schéma de transfert de chaleur par convection.

Dans le domaine de refroidissement des composants électronique, il existe deux types d'enlèvement de la chaleur par convection ; refroidissements par convection naturelle (libre) et refroidissements par convection forcée.

I-3-3-1- Convection naturel (libre) :

Il y a convection naturelle lorsque le mouvement du fluide est uniquement dû à la poussée d'Archimède induite par les variations de masse volumique au sein du fluide, lesquelles sont la conséquence des variations spatiales de température. L'air chaud, plus léger, tend alors à monter, alors que l'air froid descend.

Ce mécanisme se produit dans des situations très diverses : il est responsable de l'homogénéisation de la température dans une pièce d'habitation (transfert de chaleur du radiateur vers les parties froides de la pièce), mais également des courants marins ainsi que de la circulation générale de l'atmosphère terrestre [9].



Figure I. 4: Convection naturelle.

I-3-3-2-Convection forcée :

Dans la convection forcée, le fluide doit son mouvement à une cause extérieure (pompe, ventilateur, agitateur, etc.). En convection forcée proprement dite, la poussée d'Archimède est négligeable devant les forces servant à mettre le fluide en mouvement. C'est le cas, par exemple, du refroidissement des moteurs à combustion interne : la pompe à eau pousse le liquide de refroidissement à travers le moteur, puis dans l'échangeur [9].

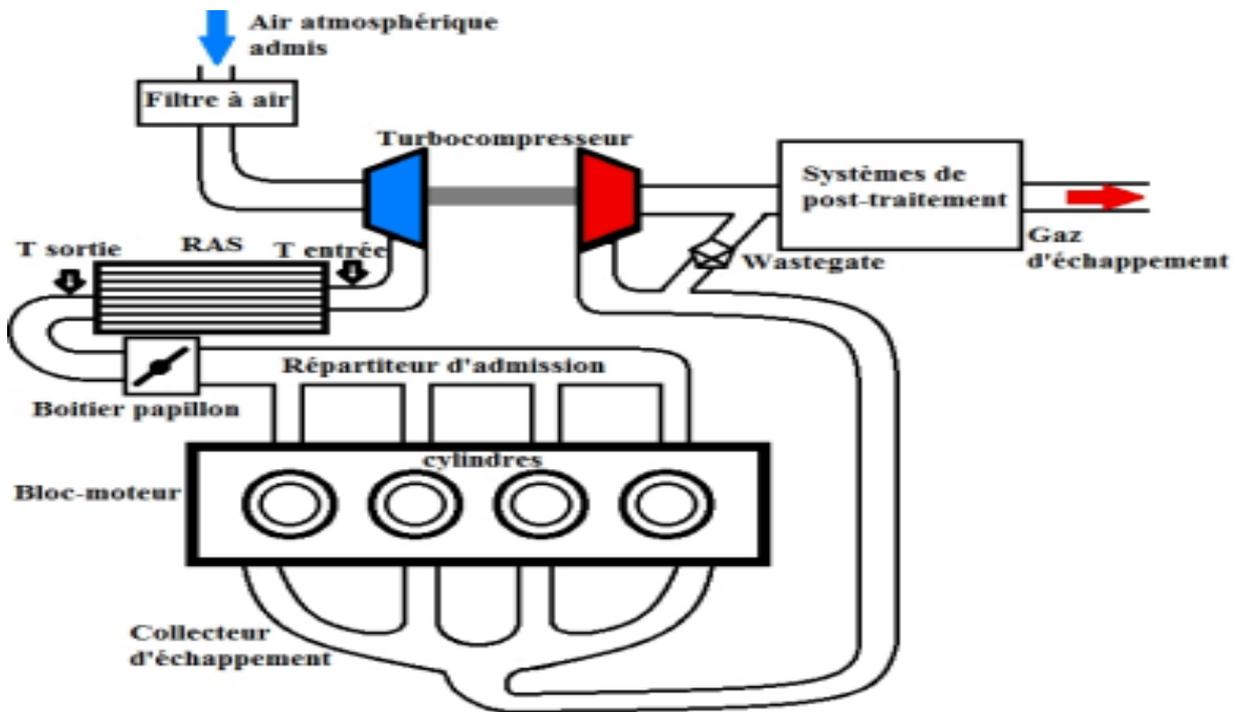


Figure I. 5: Schéma de la convection forcée [10].

I-3-4-Coefficient de transfert thermique :

Selon la loi de Newton sur le refroidissement, le taux de transfert thermique entre une surface à une température T_s et un fluide environnant à une température T_f est représenté par l'équation :

$$Q_{\text{convection}} = h A (T_s - T_f) \quad (I-1)$$

L'unité du coefficient de transfert thermique h est $W/m^2.K$. Le coefficient h n'est pas une propriété thermodynamique. Il représente une corrélation simplifiée à l'état de fluide et aux conditions de flux et est, pour cette raison, souvent appelé une propriété de flux. La convection est liée au concept d'une couche limite constituant une couche mince de transition entre une surface supposée adjacente aux molécules stationnaires et le flux de fluide environnant [11].

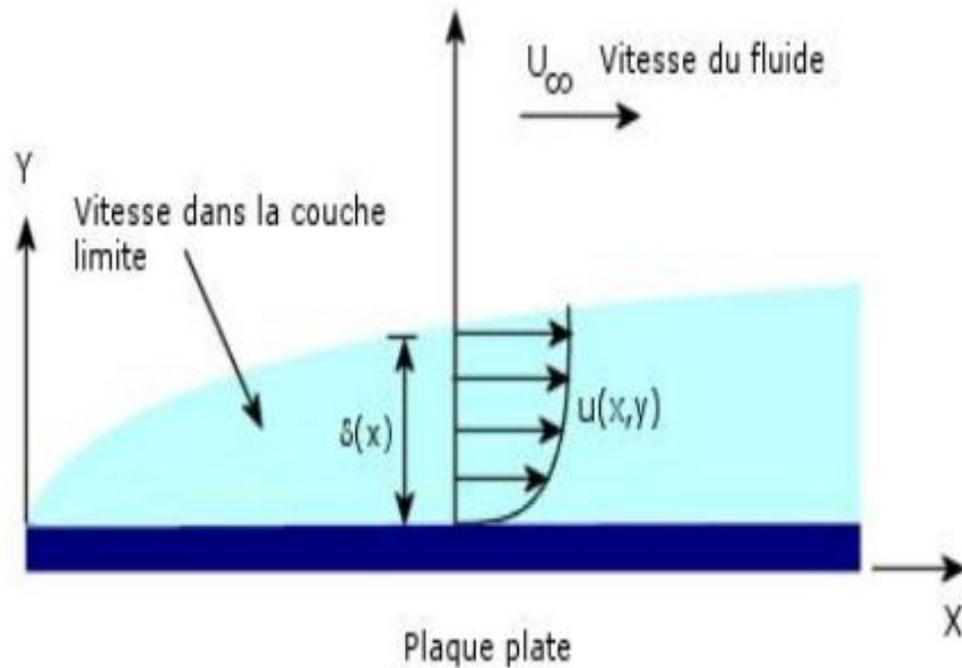


Figure I. 6: Gradient de vitesse dans la couche limite.

I-3-5-Domains d'applications de la convection naturelle :

Les domaines d'applications de transfert thermique par convection sont très vastes, au titre d'exemples ; le refroidissement des circuits électriques et électroniques, la thermique du bâtiment et le confort humain, les panaches et la dispersion des effluents, ou encore la thermique de l'atmosphère et des océans.....ect [12].

I-3-6- Quelques techniques d'amélioration du transfert de chaleur :

Pour améliorer le transfert de chaleur, plusieurs possibilités peuvent être considérées. Parmi celles-ci on va détailler les techniques citées ci-dessous:

I-3-6-1- Surfaces traitées :

Elles sont des surfaces qui ont été rendues rugueuses dans le but d'améliorer leurs performances en termes de transfert de chaleur. Ce type de surfaces est principalement employé pour des applications d'ébullition ou de condensation.

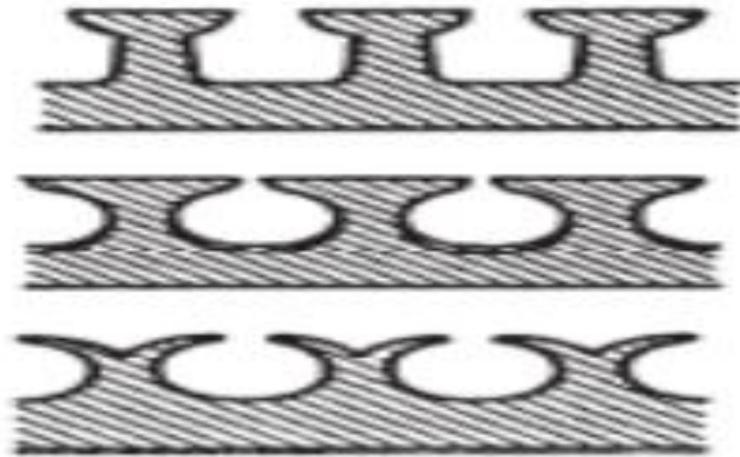


Figure I. 7: Exemples de surfaces traitées [13].

I-3-6-2-Surfaces rugueuses :

Elles sont généralement des modifications superficielles qui génèrent la turbulence dans des écoulements monophasiques et qui n'augmentent pas la surface de transfert de chaleur.

Leurs particularités géométriques s'étendent de la rugosité de grain de sable aléatoire aux protubérances discrètes superficielles.

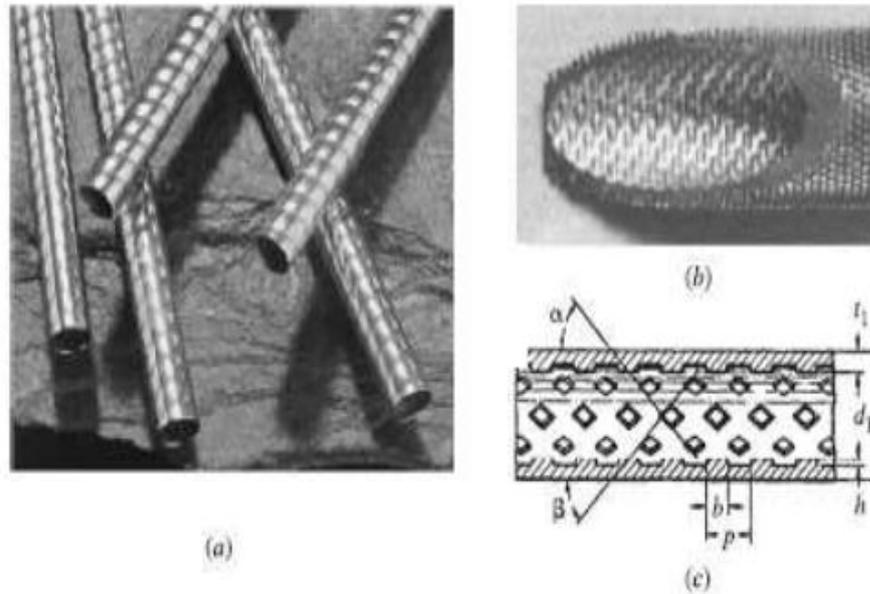


Figure I. 8: Tubes avec rugosité structurée bi et tridimensionnelle [13].

I-3-6-3- Surfaces prolongées (ailettes) :

Généralement nommées surfaces ailettes, elles fournissent une augmentation de la surface d'échange. En particulier, les ailettes plates sont généralement employées dans les échangeurs de chaleur.

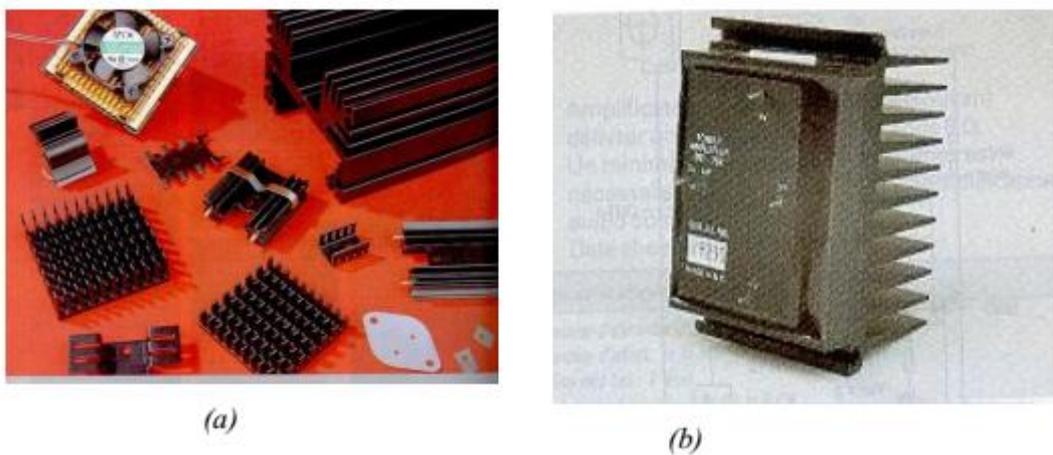


Figure I. 9: Système de refroidissement à air passif [13].

I-4-Systèmes de refroidissement des composants électroniques :

I-4-1-Composants électroniques :

Un composant électronique est un dispositif qui est un élément constitutif d'un circuit électronique. Généralement, il termine par deux broches métalliques et est encapsulé dans un matériel métallique, céramique ou plastique. Ces composants sont normalement reliés entre eux par des soudures au circuit imprimé.

Il existe différents types de composants électroniques. Les composants discrets sont encapsulés un par un (tels que les transistors ou les diodes), tandis que les composants intégrés forment des ensembles plus complexes à partir de l'union des composants discrets.

D'autres types de composants sont les actifs (ils génèrent une excitation électrique), les passifs (chargés de la connexion des composants actifs), les électromagnétiques (transformateurs, inducteurs), les électroacoustiques (microphones, casques) et les optoélectroniques [14].

Enfin, les composants semi-conducteurs sont ceux qui sont faits de matériaux semi-conducteurs (qui conduisent ou isolent l'électricité en fonction de la température ambiante) comme le silicium.

Dans le cas des circuits électroniques, il est important de faire la distinction entre les composants (les dispositifs physiques/appareils) et les éléments (abstractions ou modèles)

L'enlèvement de la chaleur de ces composants, par exemple, pour les micros – ordinateurs fonctionnant avec des processeurs de grande vitesse ayant pour but de traitement de données. De plus qu'il y a une tendance à assembler un plus grand nombre de ces composants et donc un apport important de chaleur. Par conséquent, le processus de refroidissement est d'un intérêt essentiel et primordial, puisque son but principal est le contrôle thermique de ces composants [15].

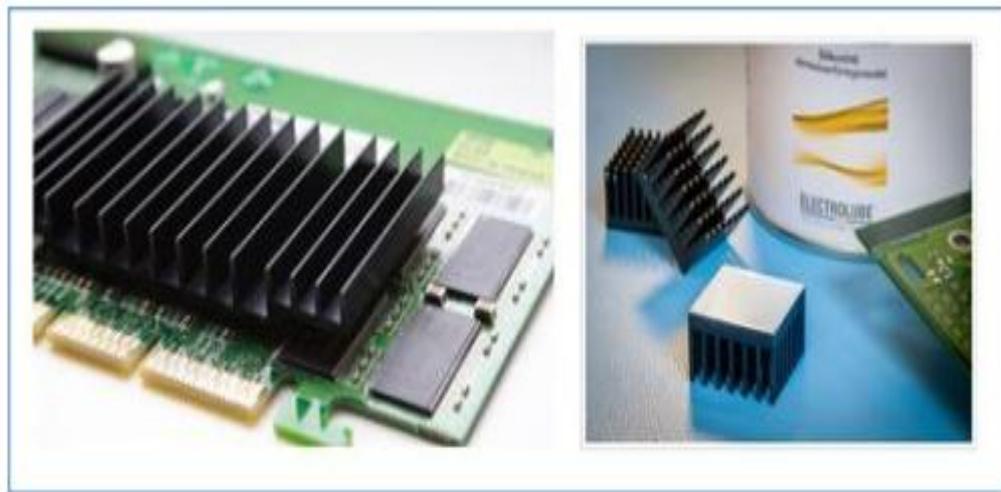


Figure I. 10: Présentation type des composants électroniques [16].

I-4-2-Systemes de refroidissement :

Dans tous les systèmes de refroidissement, la chaleur doit d'abord traverser par conduction thermique les épaisseurs des différentes couches de l'assemblage avant d'arriver au liquide de refroidissement, un soin particuliers doit donc être porté au choix des matériaux constituant ces couches et qui composent les différentes interfaces (brasures..). C'est pour cette raison que les dispositifs d'échange thermique avec l'ambient ont été développés et perfectionnés [17].

On distingue 2 modes différents de systèmes de refroidissement :

- **Systemes de refroidissement actifs :**

Cette technique est basée sur le transfert de chaleur par convection forcée et nécessite l'utilisation d'une pompe mécanique pour assurer la circulation du fluide caloporteur ainsi qu'un circuit externe afin d'évacuer la chaleur du système vers l'extérieur [18].

- **Systemes de refroidissement passifs :**

Ils ne nécessitent pas d'alimentation externe ce qui diminue le coup énergétique. Un refroidissement passif peut lui-même être classé en deux sections : direct et indirecte suivant que le fluide caloporteur soit ou ne soit pas en contact avec les composants électroniques [19].

I-4-2-1-Refroidissement à l'air :

Les systèmes de refroidissement à l'air sont utilisés pour les éléments électroniques dont la contrainte thermique est faible. Les principaux avantages de ce système de refroidissement est sa relative simplicité et le faible coût de mise en œuvre technique. Les échanges entre l'élément électronique qui est la source thermique, et l'environnement qui est le dissipateur, sont convectifs et radiatifs [20].

- **Convection naturelle par air :**

Le refroidissement passif indique qu'aucune pièce mécanique n'est en mouvement. Un simple dissipateur (un radiateur) est fixé sur le composant à refroidir, afin d'augmenter la surface de contact avec l'air ambiant, et donc de faciliter la dissipation thermique. Le refroidissement à air passif est d'abord constitué d'un dissipateur de chaleur (Figure I.11) dimensionné suivant la surface de refroidissement, celui-ci étant toujours choisi pour ses propriétés thermiques (bonne diffusivité et grande capacité thermiques, cuivre, aluminium). La chaleur émise par le composant s'épanouit dans le dissipateur thermique avant d'être dissipée dans l'air ambiant. L'ajout du dissipateur de chaleur peut donc grandement améliorer l'efficacité du refroidissement [21].

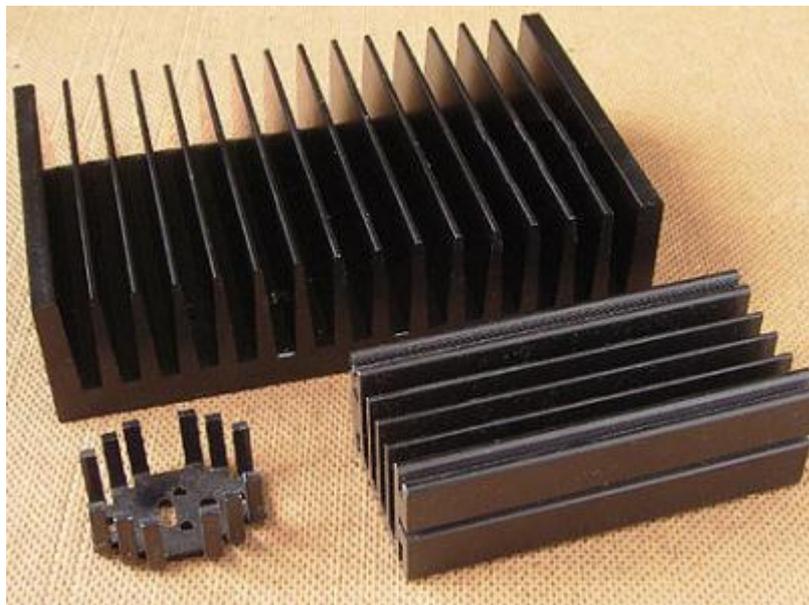


Figure I. 11: Système de refroidissement à air passif.

- **Convection forcée à air :**

Le soufflage d'air forcé grâce à des ventilateurs est la méthode la plus utilisée en refroidissement de composants électroniques de par sa simplicité de mise en œuvre, de son coût et de sa fiabilité. Le principe de fonctionnement réside en une lame en céramique alimentée en courant électrique, se mettant à osciller à de très hautes fréquences.

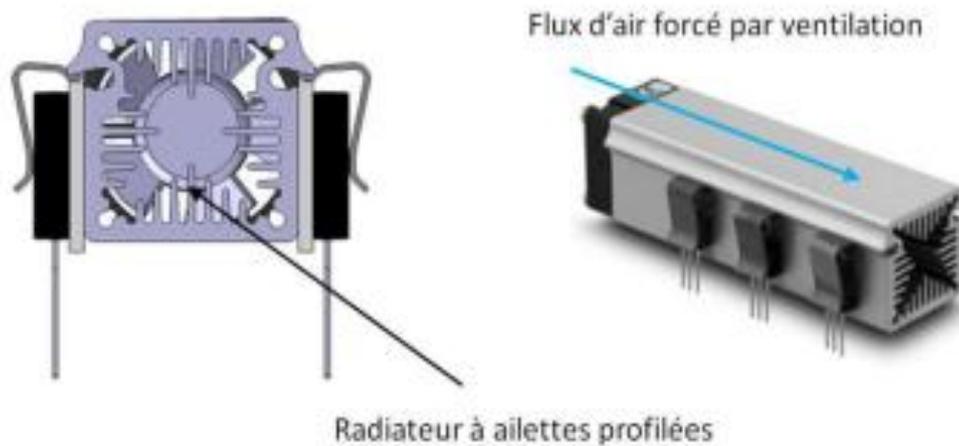


Figure I. 12: Système de refroidissement forcé par air Radiateur et ventilateur [19].

I-4-2-2-Refroidissement par liquide caloporteur :

Le refroidissement par liquide (généralement en ajoutant de l'eau) est une autre méthode pour dissiper la chaleur dans le milieu environnant. Le fonctionnement principal de refroidissement par liquide caloporteur de pouvoir transféré de la chaleur tout comme l'air, les liquides transfèrent la chaleur par convection [22].

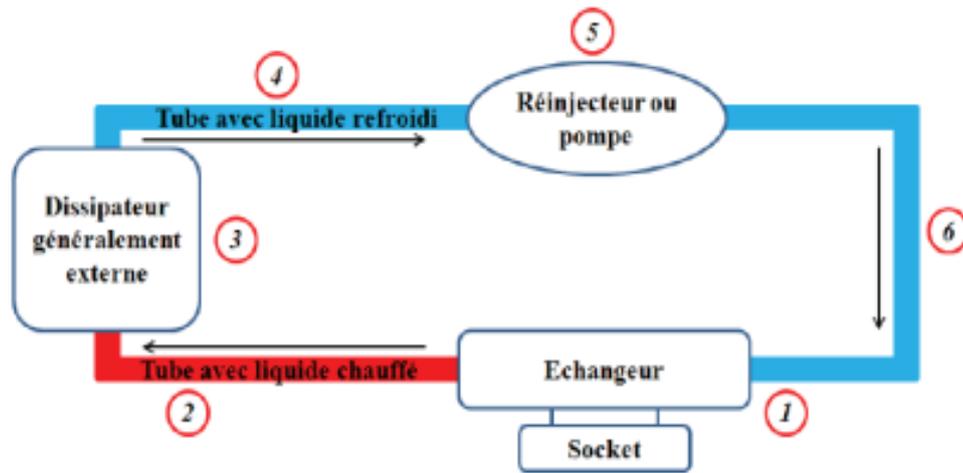


Figure I. 13: Schéma simplifié de refroidissement par liquide.

- **Refroidissement par plaques à eau :**

Une technique robuste consiste à utiliser une cavité assez proche de la source de chaleur dans laquelle le liquide circule de manière turbulente. Comme le liquide utilisé est souvent à base d'eau, cette technique se nomme plaque à eau. Une pompe est nécessaire pour contraindre le passage d'un fluide entre deux plaques après son passage dans un canal étroit afin de créer de la turbulence [23].

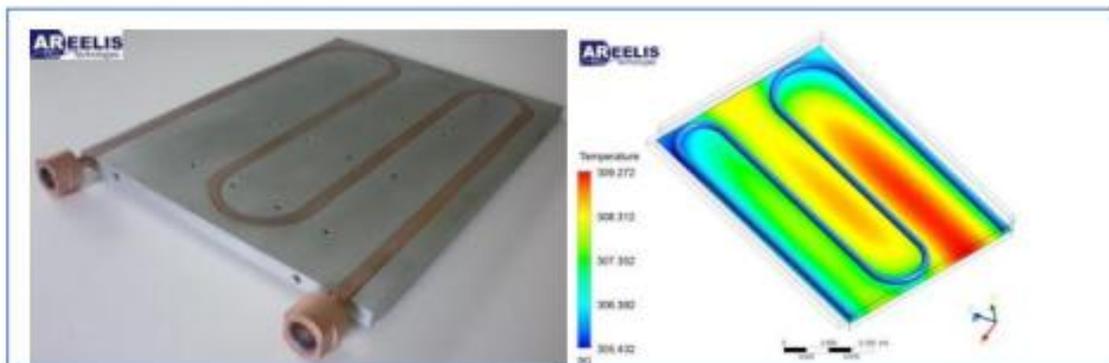


Figure I. 14: Refroidissement liquide à plaque froide [19].

- **Refroidissement par micro canaux :**

Le développement rapide du domaine de la microélectronique et l'intégration croissante de transistors à haute vitesse dans les appareils électroniques, la densité de dissipation thermique

visée devrait atteindre 500 W/cm² pour les applications futures [24], [25]. Les micro-canaux qui sont des dispositifs à refroidissement très performants utilisés en systèmes embarqués liés à l'aérospatiale par exemple et en électronique médicale.

Par rapport aux échangeurs de chaleur conventionnels, les échangeurs de chaleur à micro canaux n'offrent pas seulement un bon coefficient de transfert thermique, mais offre également une excellente robustesse notamment devant la pression du liquide [25].

Les principaux avantages :

1. Les micros canaux agissent comme plusieurs micro-plaque-ailettes. Ils augmentent la surface d'échange. La résistance thermique de convection est donc réduite.
2. Pour utiliser les micro-canaux, la plateforme sous boîtier est supprimée, donc la résistance thermique de conduction est réduite.
3. En faisant appel à la technologie des micro-canaux on peut réduire la taille de système de refroidissement.

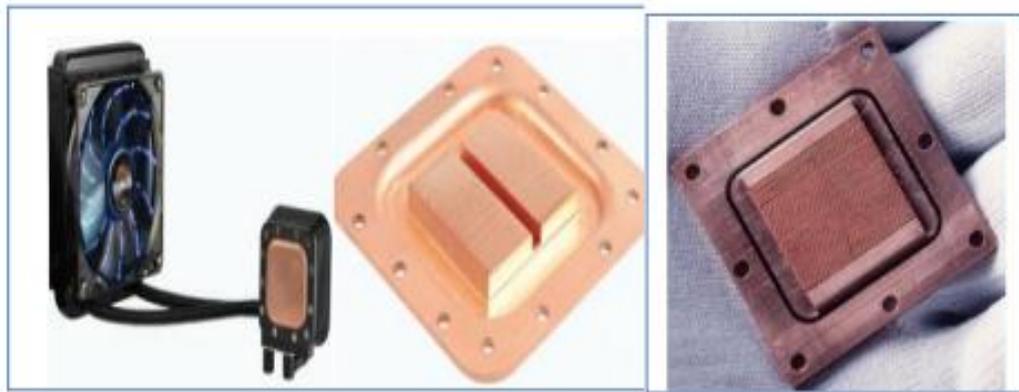


Figure I. 15: Refroidissement liquide à micro-canaux.

- **Refroidissement par mini canaux :**

Le refroidissement par mini canaux est la plus simple à réaliser. Toutefois la principale raison qui nous a amené à faire ce choix est la possibilité de limiter le volume de fluide dans ce genre de refroidisseur.

Ce paramètre est important car, la masse volumique de ce fluide est assez grande et de plus il est très cher [6].



Figure I. 16: Refroidissement liquide à mini-canaux.

I-4-2-3-Refroidissement diphasique (caloducs) :

Un caloduc est un système qui, grâce à un changement de phase d'un fluide caloporteur, prélève la chaleur d'un point et la transporte vers un autre, sans utiliser de pompe ou un autre dispositif mécanique. Il est constitué d'une enceinte étanche, dont les parois internes sont tapissées d'une structure capillaire. Il contient du liquide qui est en équilibre avec sa vapeur en l'absence totale d'air ou de tout autre gaz.

Le caloduc est composé de trois parties : évaporateur, condenseur et zone adiabatique. Son principe de fonctionnement est représenté dans la figure (I-17)

Dans la zone chauffée (l'évaporateur), le liquide s'évapore et la vapeur vient se condenser dans la zone refroidie (le condenseur). Le fluide condensé retourne vers l'évaporateur grâce à l'effet de la capillarité, développée dans le milieu poreux qui tapisse la paroi interne. Ce réseau capillaire joue le rôle moteur dans le caloduc.

Avec un réseau capillaire adapté, le caloduc peut fonctionner dans toutes les positions et par conséquent sans les effets de gravité [2].

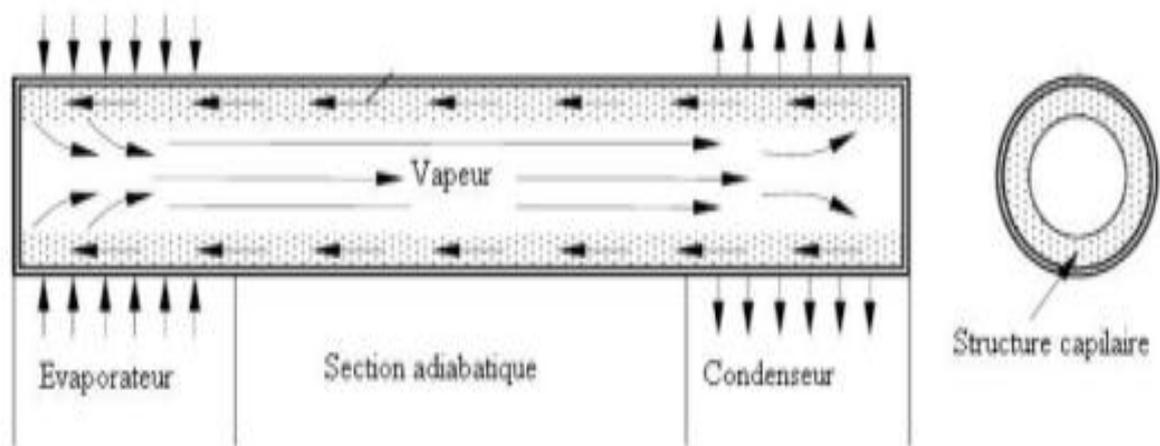


Figure I. 17: Principe de fonctionnement d'un caloduc [26].

L'intérêt principal de ce principe est que le flux de chaleur est transporté entre l'évaporateur et le condenseur avec un très faible gradient de température. Ce phénomène a été étudié par plusieurs auteurs [27, 28] qui ont montré que la valeur équivalente de la conductivité thermique de l'espace vapeur peut atteindre des valeurs 100 fois supérieures à celles du cuivre. En effet, le caloduc permet d'extraire la chaleur d'un endroit difficilement accessible et de la transférer vers une zone facilement refroidie. Ces types de structures sont utilisés dans le domaine de la microélectronique, de la médecine, de l'électronique de puissance et dans le domaine spatial, car le caloduc possède l'avantage de pouvoir fonctionner hors gravité.

I-5-1- Huile minérale :

L'huile minérale est obtenue à partir du raffinage du pétrole brut et est utilisée comme isolant dans les équipements électriques depuis plus d'un siècle. Selon la source de pétrole et le processus de raffinage, différents types de pétrole peuvent être identifiés. La Figure I.18 montre le processus de raffinage du pétrole brut. Le processus de raffinage consiste à extraire toutes les impuretés de l'huile pour lui donner de meilleures performances. Selon le type de procédé (hydrocraquage, extraction ou hydrogénation), des huiles de type paraffine, aromatiques ou naphthéniques peuvent être obtenues. Une fois les impuretés éliminées, ces huiles deviennent des mélanges très

complexes. Ils peuvent contenir plus de 3000 hydrocarbures différents [29]. Ces molécules ne contiennent que du carbone et de l'hydrogène.

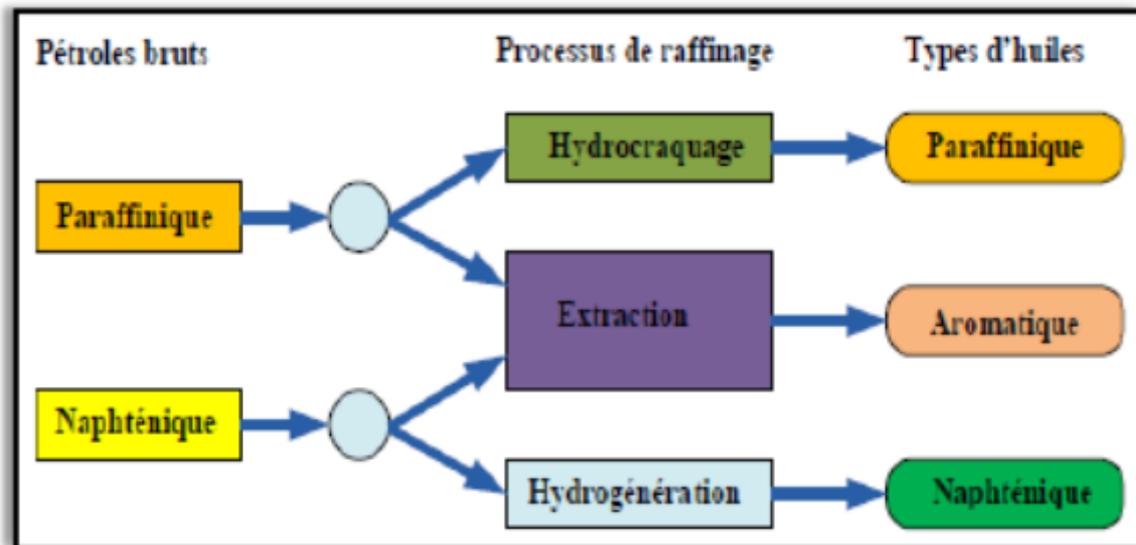


Figure I. 18: Processus de raffinage pour les huiles brutes.

I-5-2- Huiles végétales ou esters naturels :

Les esters naturels sont produits à partir d'huiles végétales et les huiles végétales elles-mêmes sont fabriquées à partir de cultures végétales qui sont des ressources renouvelables. La composition chimique générale des esters naturels est la composition chimique des triesters principalement dérivés des triglycérides. Les esters naturels sont obtenus par estérification de triols simples avec trois acides gras. Ils ne sont pas hautement toxiques et ont une excellente biodégradabilité. Ils ont une très faible résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse. Les esters naturels pour applications électriques sont généralement produits à partir d'huile de soja, d'huile de colza et d'huile de tournesol, mais des esters naturels à base d'huile de palme, d'huile de coco et d'huile de noix de cajou sont en cours de développement [30].

I-5-3- Huiles esters synthétique :

Elles sont obtenues artificiellement par synthèse chimique et se composent de molécules reconstituées, modelées et taillées sur mesure dans des conditions de températures et de pressions complètement maîtrisées. Ces huiles ne contiennent en général aucun des composés instables ou impuretés (composés sulfurés et acides, composés azotés, oxygène, impuretés métalliques...) décelables dans les huiles minérales et qui peuvent nuire à une bonne lubrification. Elles sont surtout utilisées pour des applications spéciales, principalement à des températures de fonctionnement supérieures à 90°C, ou à très basse température [31].

I-7- Synthèse bibliographique :

Les problèmes de dissipation thermique a une grande importance dans le domaine de L'industrie électronique l'étude et la maitrise de ces problèmes est indispensable afin d'assurer Les garanties de fonctionnement et la fiabilité. La génération excessive de la chaleur nécessite une bonne et suffisante évacuation de la chaleur, sinon la durée de vie des composants électroniques sera affectée par cette génération excessive de chaleur. Un grand nombre des travaux numériques et expérimentaux ont été effectué par les chercheurs et les scientifiques concernant la convection sous ses trois formes, parmi ces travaux :

Seo Young et al [32] Ont simulé l'écoulement pulsatif et les caractéristiques du transfert de chaleur qui l'accompagne en présence de deux blocs chauffés.

Hsieh et Huang [33] Ont étudié la convection forcée sur une surface montée de blocs, Ils présentent de corrélations du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds et de la largeur du bloc.

Y.L. Tsay et J.C. Cheng [34] ont présenté une étude numérique sur les caractéristiques thermiques de l'écoulement de la convection forcée laminaire dans un canal contenant plusieurs panneaux courts montés avec des blocs générateurs de chaleur. L'utilisation des logiciels de calcul devient très répandue.

C. Benseghir [35] a étudié numériquement la convection naturelle laminaire instationnaire dans une cavité différentiellement chauffée et remplie d'air. Une ou plusieurs ailettes minces ont été placées sur la paroi chaude de la cavité. Les équations gouvernantes ont été discrétisées par la méthode des volumes finis en

utilisant un schéma hybride. L'influence des paramètres de contrôle (nombre de Rayleigh, rapport d'aspect, nombre de l'ailettes, leurs positions et longueurs) a été considérée

Vahl Davis [36] a présenté une solution numérique de la convection naturelle dans une cavité carrée chauffée différentiellement, où les deux surfaces supérieure et inférieure sont adiabatiques.

D.Menacer, M.Khammar [37] ont étudié le refroidissement des cartes électroniques via l'étude de la convection mixte dans une cavité. Le but de leur étude est d'examiner la structure de l'écoulement d'un fluide non-Newtonien confiné dans une cavité 2D remplie d'air dont les parois latérales sont isolées thermiquement ont placé une source de chaleur au centre de la surface inférieure, et l'a soumis à un flux de chaleur constant. Le côté gauche se déplace vers le haut avec une vitesse constante u_0 , mais la partie supérieure est maintenue à une température froide. Les résultats obtenus ont montré un effet significatif du nombre de Richardson et de la surface en mouvement sur la structure de l'écoulement dans l'enclosure.

Karim Lahmer, Rachid bessaih [38] ont étudié le phénomène de transfert de chaleur par convection naturelle laminaire dans un domaine vertical, bidimensionnel, ouvert à l'atmosphère et contenant deux composants électroniques assimilés à des sources de chaleur montées sur une paroi verticale adiabatique ; ces dernières sont soumises à un refroidissement par air dont les paramètres géométriques et physiques varient. La méthode des volumes finis a été utilisée afin de discrétiser les équations de l'écoulement en convection naturelle en régime stationnaire ainsi que l'algorithme SIMPLER pour les résoudre. Les résultats obtenus montrent que pour un nombre de $Pr = 0.71$ et en faisant varier les maillages, le nombre de Grashof, l'espace entre les composants et la distance à la sortie supérieure du domaine, il se crée une incidence considérable sur le nombre de Nusselt au niveau des sources, engendrant par conséquent une grande influence sur le transfert de chaleur à l'intérieur du domaine d'étude.

Adel Hamouche , Rachid Bessaih [39] ce travail étudié numériquement le refroidissement par convection mixte des composants électroniques montés dans un canal rectangulaire horizontal. La méthode des volumes finis et l'algorithme SIMPLER ont été utilisés pour résoudre les équations de l'écoulement en régime stationnaire. Les résultats obtenus montrent

que pour $Pr=0.71$, $0 \leq Ri \leq 40$ et $Re=20$, l'effet de Ri , du blocage partiel, des dimensions et la position de l'élément de blocage, ont des effets considérables sur l'amélioration du transfert de chaleur à l'intérieur du canal.

Wang et Jaluria [40] L'étude est dans le contexte de refroidissement des équipements électroniques. Le nombre de Grashof est fixé à 106. Les résultats montrent que le nombre de Reynolds, l'arrangement spatial des sources de chaleur et le rapport des conductivités thermiques ($K=K_s/K_{air}$) ont des effets considérables sur l'amélioration du transfert de chaleur, ce qui conduit à une température moyenne plus faible pour les deux sources de chaleur. La possibilité d'optimiser l'arrangement spatial des sources pour le transfert thermique maximal est évidente d'après ces résultats. Les magnitudes de la conduction et le transport de la convection ont été comparés pour différentes combinaisons paramétriques.

Bhowmik et Tou [41] ont étudié expérimentalement le transfert de chaleur par convection forcée transitoire monophasée sur un ensemble de sources de chaleur discrètes placées dans un canal rectangulaire vertical pendant le fonctionnement transitoire d'une pompe. Les résultats expérimentaux indiquent que le coefficient de transfert de chaleur es fortement affecté par le nombre des sources et au nombre de Reynolds.

Furukawa et Yang [42] ont développé une méthode numérique pour connaître le comportement d'un fluide thermique dans deux plans parallèles où se trouvent des blocs générateurs de chaleur (sources de chaleur). Le système simule les passages de l'air de refroidissement à ces blocs dans un ensemble de circuits électroniques. Les résultats révèlent qu'à des valeurs basses du nombre de Reynolds, l'écoulement atteindra un état d'écoulement complètement développé en un certain bloc à l'entrée et que la conductivité thermique de la plaque et la résistance thermique de contact entre l'élément générateur de chaleur et cette plaque a un impact considérable sur les performances thermiques.

Une investigation numérique a été entreprise par **Boutina et Bessaih [43]**, ils ont étudié le refroidissement à air des sources de chaleur, simulant des composants électroniques, par convection mixte bidimensionnelle, laminaire et stationnaire dans un canal. Leurs résultats ont montré que les effets de l'angle d'inclinaison du canal, du nombre de Reynolds, de

l'espace entre les sources de chaleur et leurs tailles, ont des effets considérables sur le champ d'écoulement, le transfert de chaleur à l'intérieur du canal. Des corrélations des nombres de Nusselt moyen des deux composants ont été obtenues et les résultats ont été comparés avec les travaux antérieurs trouvés dans la littérature.

L'utilisation des fentes dans le but de l'amélioration des performances du refroidissement dans des canaux avec six plaques sur lesquelles sont disposés des blocs chauffants simulant des composants électroniques a été proposée et étudiée par **Kim et Anand (2000) [44]**, L'écoulement considéré étant laminaire, bidimensionnel et stationnaire. Les auteurs ont examiné les effets du nombre de Reynolds Re , la hauteur des blocs et la taille des fentes et leur position sur la température des blocs et le nombre de Nusselt Nu . Leurs résultats ont permis de trouver le cas optimal (en utilisant des fentes) avec lequel le transfert de chaleur est meilleur par rapport aux autres cas et à la configuration de base, c'est à dire sans fentes.

I-8- Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une introduction au transfert thermique, On a aussi détaillé les différentes méthodes de refroidissement des composants électroniques, Cette étude va nous permettre d'extraire les paramètres les plus influents tel que : les types d'huiles (minérale, végétale, synthétique), surfaces traitées, et ce en vue d'entamer l'étude thermique numérique dans les meilleures conditions.



Chapitre II

- **Model physique et formulation mathématique**

II-1- Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons la configuration considérée dans cette étude ainsi que les équations gouvernantes, les conditions initiales et celles aux limites imposées [45].

II-2- Description du problème :

La configuration étudiée est représentée dans la figure (II-1).

C'est une cavité rectangulaire de hauteur (h), longueur (L) et d'épaisseur (e) remplie d'huile silicone. Les dimensions de la cavité étant : $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 5\text{mm}$.

Les parois localisées à : $[z=0 \text{ et } e, 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq y_1 \text{ et } y_2 \leq y \leq H]$ étant soumises à des conditions de Dirichlet en température tandis que les autres parois sont maintenues adiabatiques (conditions de Neumann) [45].

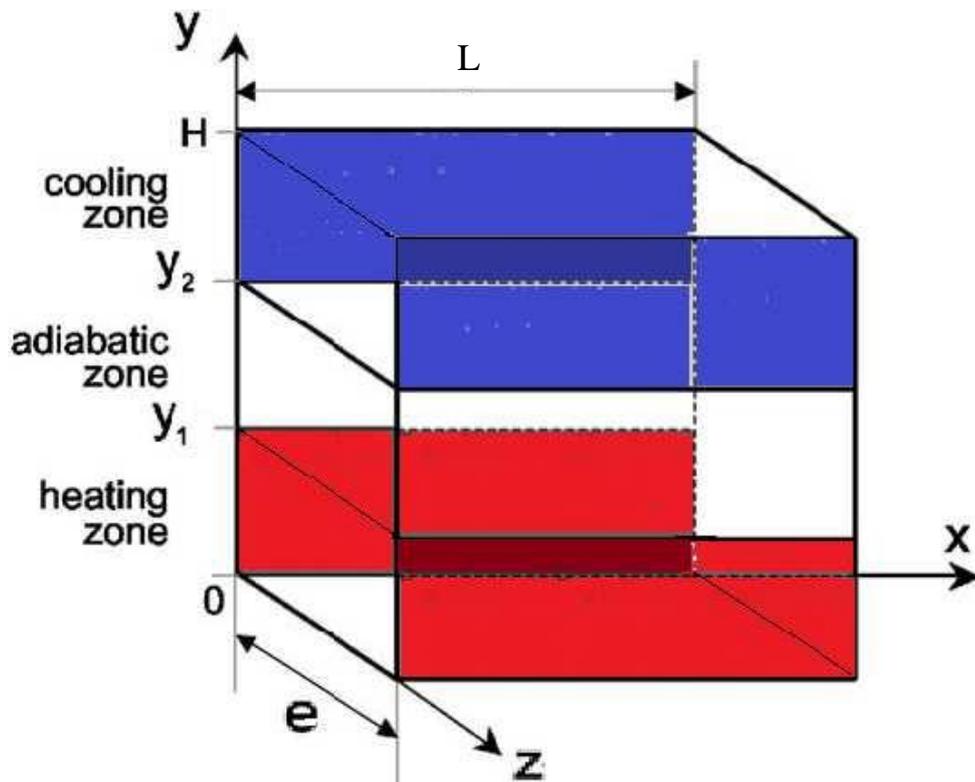


Figure II. 1: Schéma de la configuration considérée [45].

II-3- Hypothèses simplificatrices :

Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices nous sera utile dans la modélisation mathématique de notre problème. D'une part, ces hypothèses permettent d'éviter un alourdissement inutile du problème et d'autre part, elles rendent l'application des conditions aux limites plus simple, c'est hypothèses sont [45]:

- Le fluide est newtonien et incompressible.
- Les propriétés physiques du fluide sont constantes, sauf la masse volumique, qui obéit à l'approximation de Boussinesq dans le terme de la poussée d'Archimède.
- L'écoulement est stationnaire.
- L'écoulement est laminaire.
- La masse volumique varie linéairement avec la température et elle est donnée par la relation suivante :

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)] \quad (\text{II} - 1)$$

β : Coefficient de dilatation cubique du fluide.

ρ_0 : Masse volumique de référence (à la température de référence).

T_0 : Température de référence.

II-4- Equations du modèle mathématique :

II-4-1- Equations gouvernantes dimensionnelles :

Les équations régissant l'écoulement sont les équations de continuité, de Navier-Stokes et d'énergie, qui expriment la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Pour une formulation simple du problème, nous allons considérer quelques approximations entre autres l'approximation de Boussinesq [45].

L'hypothèse de Boussinesq ne devrait pas être employée si les différences de température dans le domaine d'étude sont grandes. En outre, elle ne peut pas être utilisée dans les calculs de combustion ou les écoulements réactifs [46].

II-4-1-a- Equation de continuité :

C'est l'équation, qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante [45]:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \text{div}(\rho \cdot v) = 0 \tag{II-2}$$

Où : v est le vecteur de vitesse.

Après simplification devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{II-3}$$

II -4-1-b- Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes)

Cette équation est déduite de la deuxième loi de la dynamique, qui stipule que la variation de la quantité de mouvement d'une particule fluide est égale la somme des forces extérieures sur cette particule.

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide et son mouvement et les causes qui le produisent [47] :

$$\begin{aligned} \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \\ \rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) + \rho g \beta(T - T_c) \\ \rho(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \end{aligned} \tag{II-4}$$

II-4-1-c- Equation de l'énergie :

L'équation de l'énergie est obtenue en appliquant le premier principe de la thermodynamique pour un fluide Newtonien incompressible, elle s'écrit comme suit [45]

$$\frac{D}{Dt} (\rho c_p T) = \Delta(\lambda T) + q + \beta T \frac{D\rho}{Dt} + \mu\phi \quad (\text{II-5})$$

Avec :

$\frac{D}{Dt} (\rho c_p T)$: La variation totale d'énergie.

$\Delta(\lambda T)$: La variation d'énergie par conduction.

$\beta T \frac{D\rho}{Dt}$: La variation d'énergie due à la compressibilité.

Qui après simplification devient :

$$\rho c (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) = \lambda (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) \quad (\text{II-6})$$

II-4-2- Equations gouvernantes adimensionnelles

L'adimensionnalisations consiste à transformer les variables dimensionnelles en variables sans dimensions, c'est-à-dire qu'elles seront normalisées par rapport à certaines grandeurs caractéristiques. Cela permet de spécifier les conditions d'écoulement avec un nombre restreint de paramètres pour rendre la solution plus générale. La formulation en variables adimensionnées est importante pour simplifier les équations qui régissent l'écoulement et pour guider les expérimentations qui doivent être effectuées. Pour établir les équations adimensionnelles, au lieu d'utiliser les coordonnées (x, y, z) et les composantes (u, v, w) de la vitesse et la pression (p), nous utiliserons de nouvelles variables adimensionnelles définies de la manière suivante [48]:

$$Y = \frac{y}{H}, X = \frac{x}{L}, U = \frac{u}{vH / L}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, P = \frac{p}{\rho_0 (\frac{v}{l})^2}$$

Les équations adimensionnelles deviennent alors :

- Equation de continuité

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (\text{II-7})$$

- Equations de quantité de mouvement

Suivant X :

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Ar^2} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \quad (\text{II-8})$$

Suivant Y :

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} = -\frac{1}{Ar^2} \frac{\partial P}{\partial Y} - \frac{Gr}{Ar} \theta + \frac{1}{Ar^2} \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \quad (\text{II-9})$$

- Equation de l'énergie

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} = \frac{1}{Pr} \left[\frac{1}{Ar^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right] \quad (\text{II-10})$$

II-4-2- a : Nombre de Grashof :

C'est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la convection naturelle dans un fluide. Il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses. On le définit par [49]:

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T L_c^3}{\nu^2} \quad (\text{II-11})$$

Où :

L_c : Longueur caractéristique entre la paroi chaude et la paroi froide, telle que dans notre cas, la longueur caractéristique c'est la hauteur de la cavité (H).

II-4-2- b : Nombre de Rayleigh

C'est un nombre adimensionnel utilisé en mécanique des fluides et caractérisant le transfert de chaleur au sein d'un fluide. Inférieur à une valeur critique de 2000, le transfert s'opère par conduction, au-delà de cette valeur, c'est la convection naturelle (libre) qui devient importante. On le définit de la manière suivante [49]:

$$Ra = Gr \times Pr = \frac{g \beta (T_c - T_f) L_c^4}{\nu a} \quad (\text{II-12})$$

g : Accélération de la pesanteur.

β : Coefficient de dilatation.

a : Diffusivité thermique.

L_c : Longueur caractéristique entre la paroi chaude et la paroi froide

T_c : Température chaude.

T_f : Température froide.

ν : Viscosité cinématique.

II-4-2-c : Nombre de Prandtl

C'est un nombre adimensionnel. Il représente le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement (ou viscosité cinématique) et la diffusivité thermique. On le définit de la manière suivante [49] :

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (\text{II-13})$$

II-5- Conditions aux limites et initiales

La résolution du système d'équations obtenu précédemment nécessite l'incorporation des conditions aux limites pour chaque variable. Les conditions de température sont imposées au niveau des parois comme dans la référence [45].

Les conditions aux limites associées au problème sont donc :

- Conditions de Dirichlet :

$T=T_c$ si $z=0$ et e, $0 \leq x \leq L$, $0 \leq y \leq y_1$ correspondant à la partie chaude.

$T=T_f$ si $z=0$ et e, $0 \leq x \leq L$, $y_2 \leq y \leq H$ correspondant à la partie froide.

- Conditions de Neumann :

Les autres parties sont maintenues adiabatiques.

II-6-Transfert de chaleur :

Le taux du transfert de la chaleur par convection est décrit par le nombre de Nusselt qui est le rapport entre la chaleur transférée par convection et conduction par rapport à la chaleur transférée par conduction pure. Le nombre de Nusselt (Nu) est défini comme suit [49]:

$$Nu = \frac{h.L_c}{\lambda} \quad (\text{II-14})$$

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection.

λ : Conductivité thermique du fluide.

Pour une cavité chauffée différentiellement, le Nusselt moyen peut être calculé en moyennant les nombres de Nusselt locaux qui sont calculés au niveau de tous les nœuds de la paroi froide ou chaude [49].

Le Nusselt moyen est alors donné par la relation suivante :

Conductivité thermique du liquide.

$$Nu = \frac{\sum \text{noeuds} Nu_{local}}{n} \quad (\text{II-15})$$

n = nombre des nœuds.

Le flux de transfert de chaleur est donné par:

$$\phi = h.S.(T_c - T_f) \quad (\text{II-16})$$

Avec :

S : surface d'échange.

T_c : la température de la paroi chaude.

T_f : la température de la paroi froide.

La densité de flux de la chaleur :

$$\varphi = h(T_c - T_f) \quad (\text{II-17})$$

II-7- Conclusion

Le modèle mathématique est alors constitué d'un système d'équations complété par des conditions aux limites. Les équations de bilan sont donc connues mais :

- La résolution analytique de ces équations de bilan n'est pratiquement jamais réalisable.
- Les non-linéarités visibles dans les équations sont principalement à l'origine des difficultés pour obtenir une solution analytique.

Donc, l'utilisation des méthodes numériques s'avère indispensable pour la résolution du système d'équations obtenu. Dans notre étude, on a utilisé le code CFD FLUENT (v 6.3.26), basé sur la méthode des volumes finis, pour résoudre les différentes équations [49].



Chapitre III

- **Résultats et discussions**

III-1- Introduction :

Dans cette partie nous exposons les résultats de simulation obtenus à l'aide du code CFD « FLUENT » et le mailleur Gambit, en adoptant les mêmes conditions citées ci-dessus (chapitre II).

En premier lieu, nous présentons un test d'optimisation du maillage, dans le but de bien choisir le maillage convenable à notre étude. Les résultats seront ainsi validés par comparaison avec ceux obtenus par d'autres auteurs. En revanche, l'évolution des résidus a été présentée pour assurer la convergence de la solution.

Dans notre cas, nous présentons les champs de température et de vitesse le long de la paroi verticale. Les variations du Flux et Nusselt moyens pour différents fluides de travail sont également illustrées dans cette étude.

III-2- Optimisation du maillage

III-2-a- Maillage non raffiné (12500)

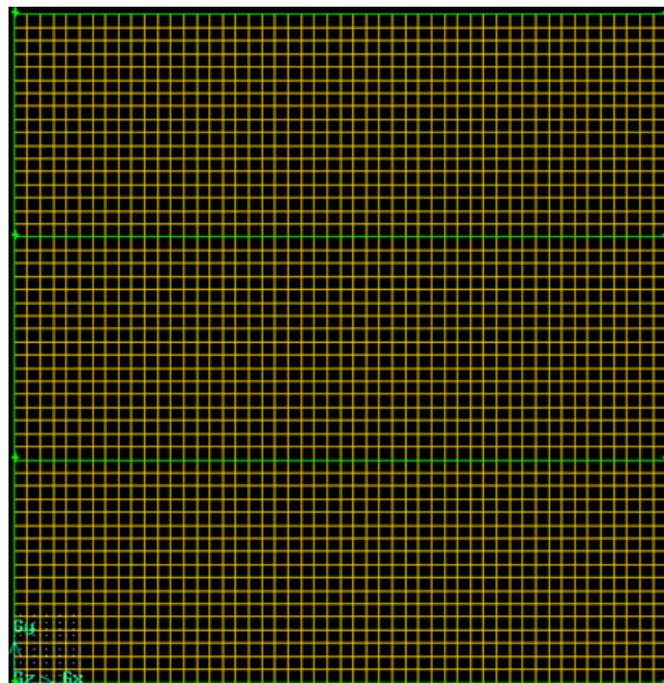


Figure III. 1:Maillage non raffiné de la cavité (12500)

Les résultats obtenus pour ce maillage sont présentés ci-dessous :

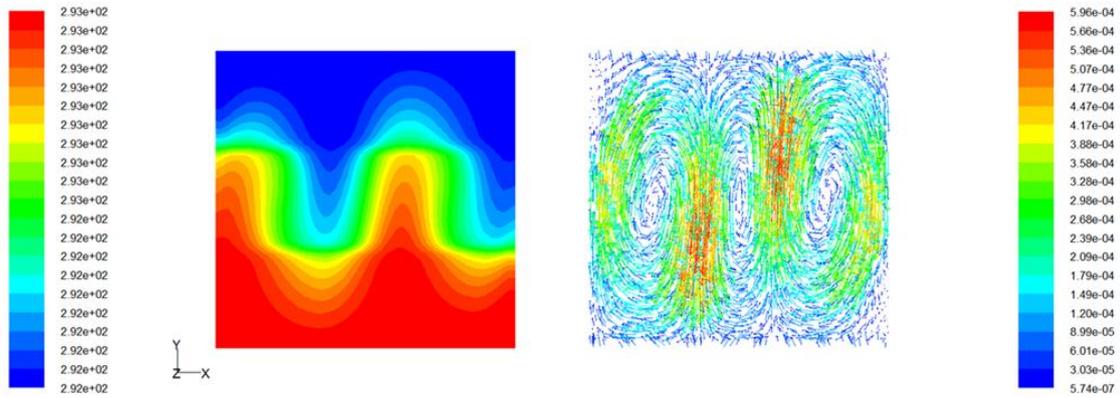


Figure III. 2: Champs de vitesse et de température pour le maillage (12500).

III-2-b- Maillage non raffiné (112500)

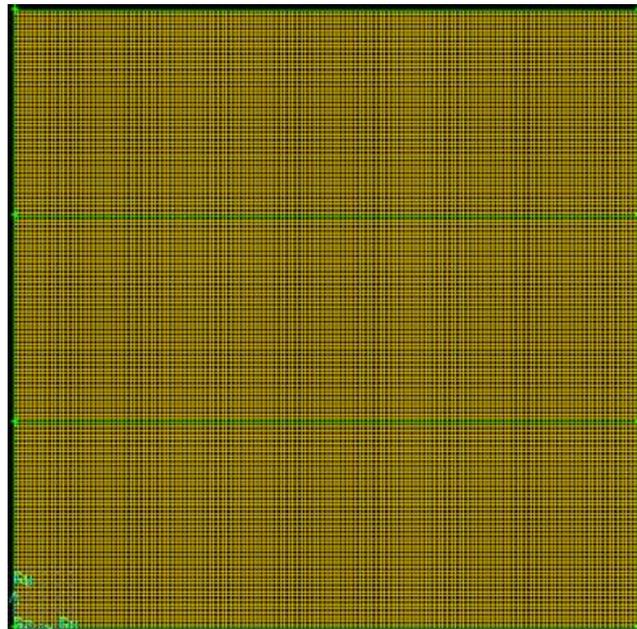


Figure III. 3: Maillage non raffiné de la cavité (112500).

Les résultats obtenus pour ce maillage sont présentés ci-dessous:

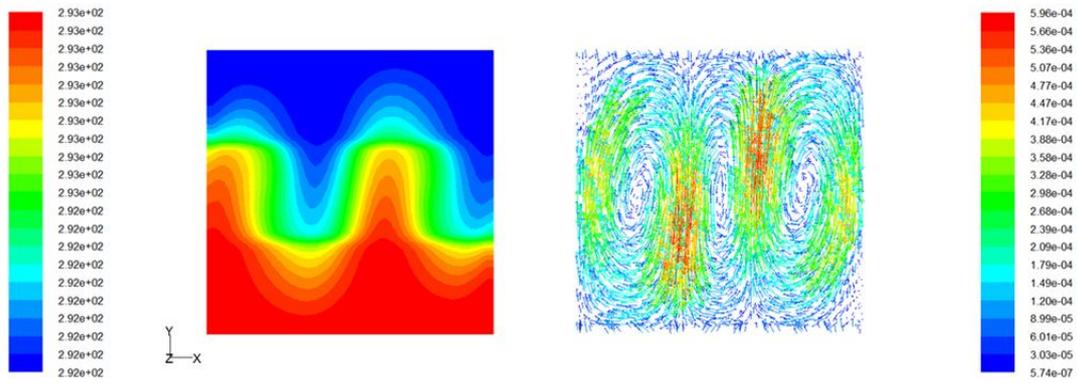


Figure III. 4: Champs de vitesse et de température pour le maillage (112500).

III-2-c- Maillage raffiné (150000)

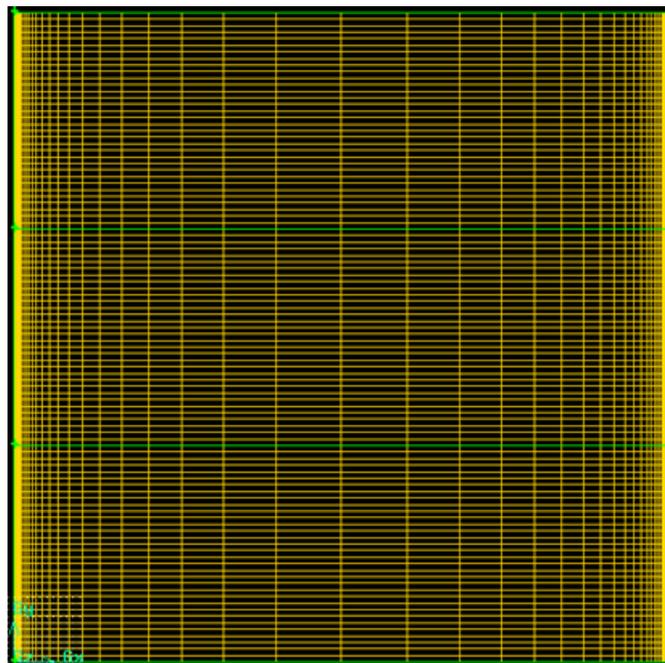


Figure III. 5: Maillage raffiné de la cavité (150000).

Les résultats obtenus pour ce maillage sont présentés ci-dessous:

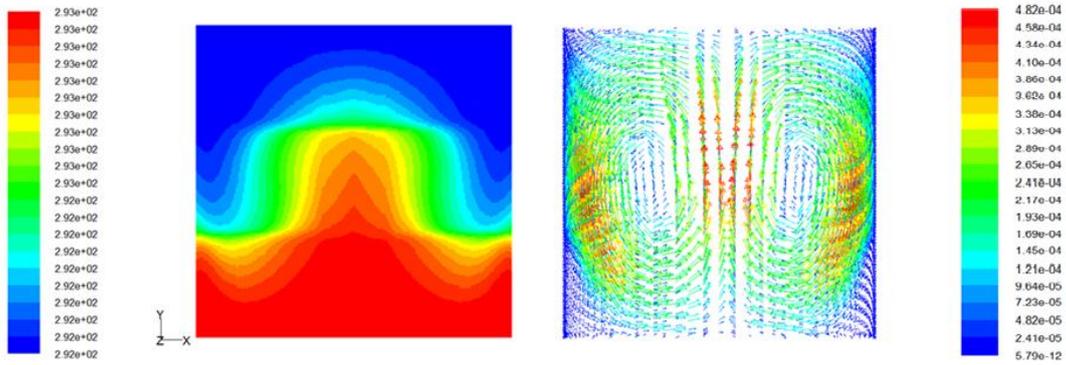


Figure III. 6: Champs de vitesse et de température pour le maillage raffiné (150000).

III-2-d- Maillage non raffiné (150000)

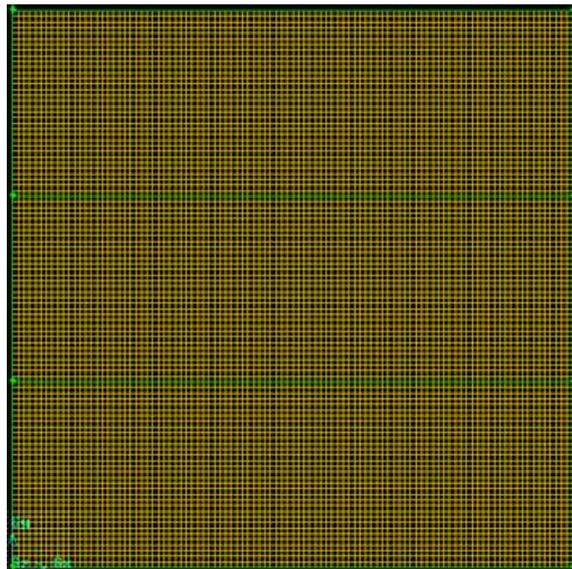


Figure III. 7: Maillage non raffiné de la cavité (150000).

Les résultats obtenus pour ce maillage sont présentés ci-dessous :

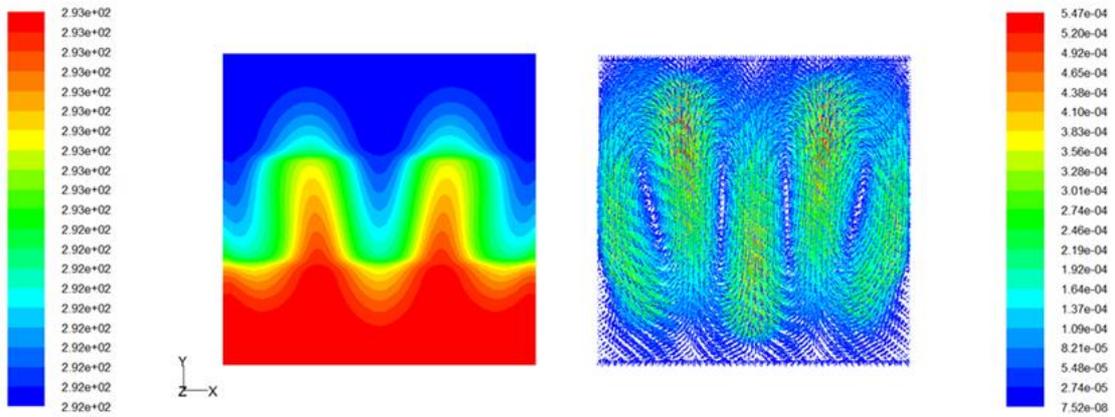


Figure III. 8: Champs de vitesse et de température pour le maillage non raffiné (150000).

III-2-e- Maillage non raffiné (244500)

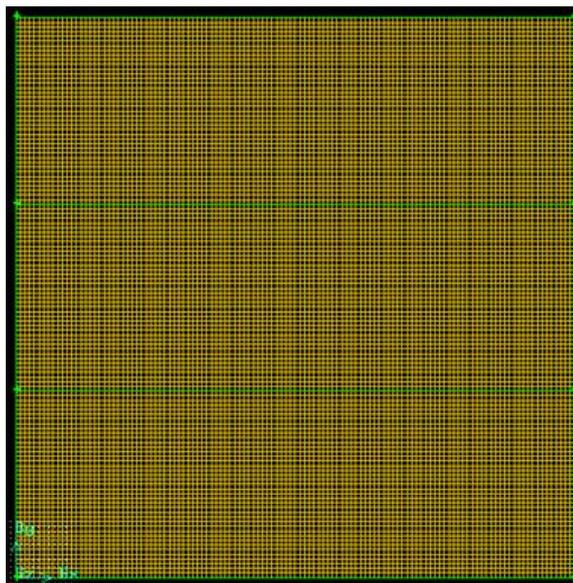


Figure III. 9: Maillage de la cavité (244500).

Les résultats obtenus pour ce maillage sont présentés ci-dessous :

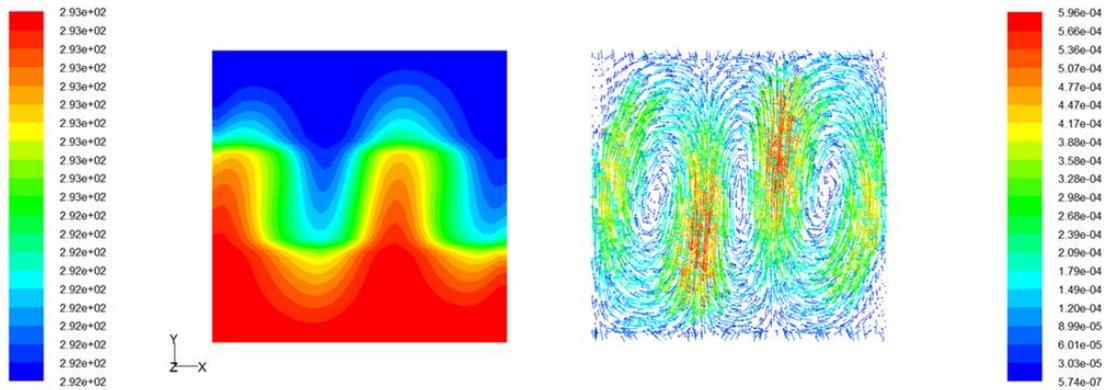


Figure III. 10: Champs de vitesse et de température pour le maillage non raffiné (144500).

D'après ces résultats, on a constaté qu'à partir du maillage (150000), les champs de température et de vitesses ne varient plus avec le maillage, donc on va mener nos simulations avec ce maillage pour toutes les simulations dont les résultats sont exposés dans ce qui suit.

La première étape consiste à valider notre simulation numérique en comparant nos résultats avec ceux publiés par d'autres auteurs. Il est utile de valider au préalable notre procédure de simulation numérique en utilisant le code Fluent et le mailleur Gambit.

III-3- Validation :

Afin d'élaborer une comparaison des résultats obtenus par nos simulations numériques avec ceux expérimentaux et numériques disponibles dans la littérature et de proposer des interprétations aux phénomènes observés, il est utile de valider au préalable notre procédure de simulation numérique en utilisant le code Fluent.

Dans le présent travail, les résultats de l'article de I. Ishihara et al [45]. Ont été utilisés. Pour cela, on a considéré les mêmes conditions (fluide de convection : huile silicone, cavité rectangulaire de dimensions (100mm*100mm*50mm), régime laminaire, $\Delta T=1$ K, $Pr = 212$ et $Ra = 1,95 \cdot 10^5$) que I. Ishihara et al [45] qui ont obtenus des résultats numériques (figure III.11-a) et expérimentaux (figure III.11-c).

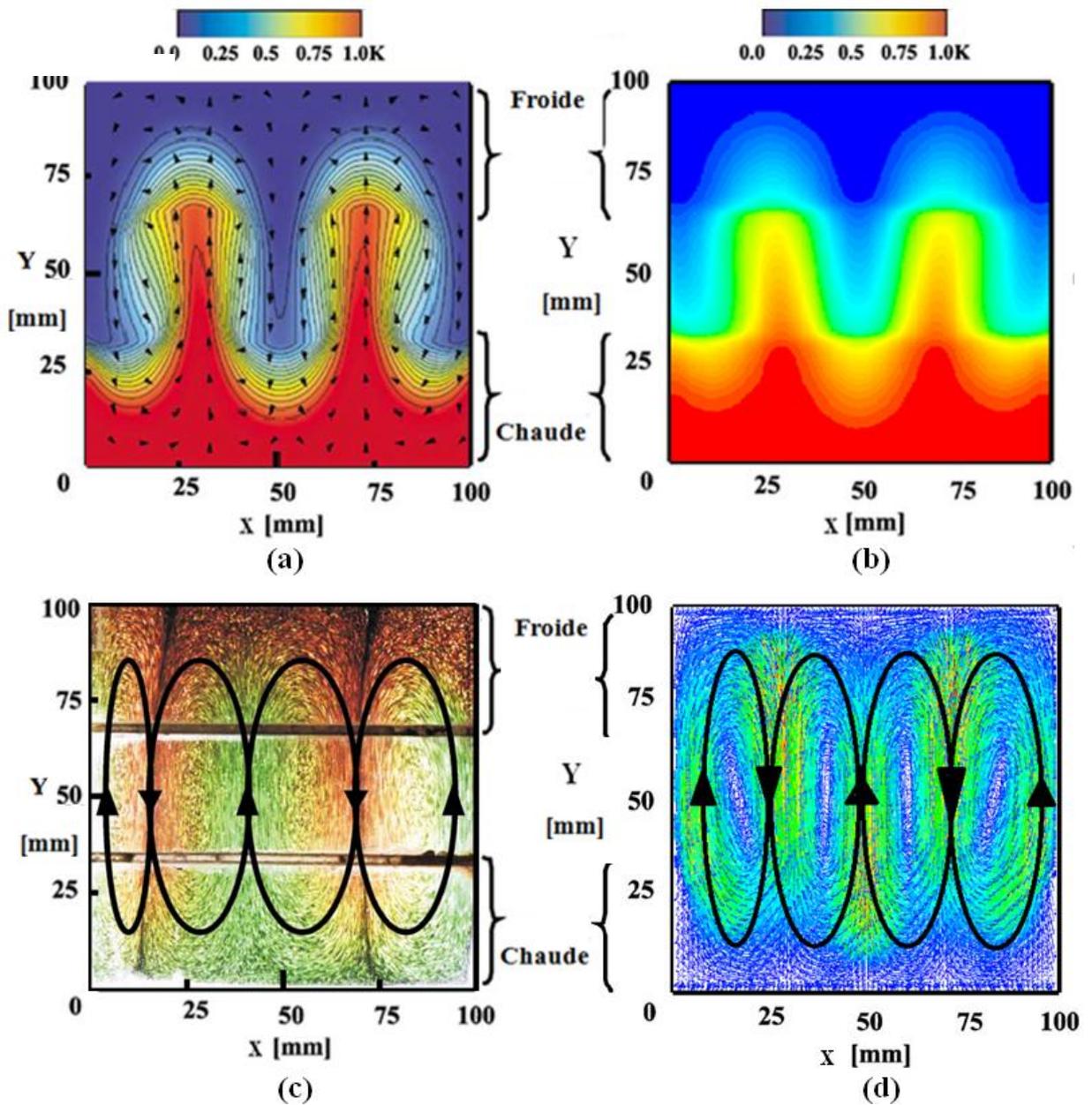


Figure III. 11: Comparaison des résultats pour $Pr = 212$ et $Ra = 1,95 \cdot 10^5$ (b), (d) présente étude. (a), (c) résultats de I, Ishihara et al. [45].

Les figures (III.11-a) et (III.11-b), (III.11-c) et (III.11-d) représentent respectivement la comparaison des champs de température et de vitesse pour $Pr = 212$ et $Ra = 1,95 \cdot 10^5$. D'après la figure 20, on remarque que nos résultats sont en bon accord qualitatif avec ceux présentés dans [45]. Donc notre procédure de simulation numérique a été validée par comparaison avec les résultats expérimentaux et numériques de travaux publiés par I, Ishihara et al. [45].

III-4-Influence du fluide :

Pour voir l'influence du fluide, on a comparé l'huile silicone de référence, les fluides A, B, C, D, E et F pour les mêmes dimensions de la cavité (100mm * 100 mm * 5 mm) et la même différence de température ($\Delta T=1$ K) avec le plexiglas comme matériau pour les parois solides. A partir des champs de vitesse et de température obtenus (Figures III.12-25), on a calculé les flux de chaleur et les nombre de Nusselt moyens qui sont présentés dans le tableau (III-1).

III-4- 1-Huile silicone de référence

Dans les figures suivantes, nous présentons les champs de vitesse et de température avec l'huile silicone de référence comme fluide convective.

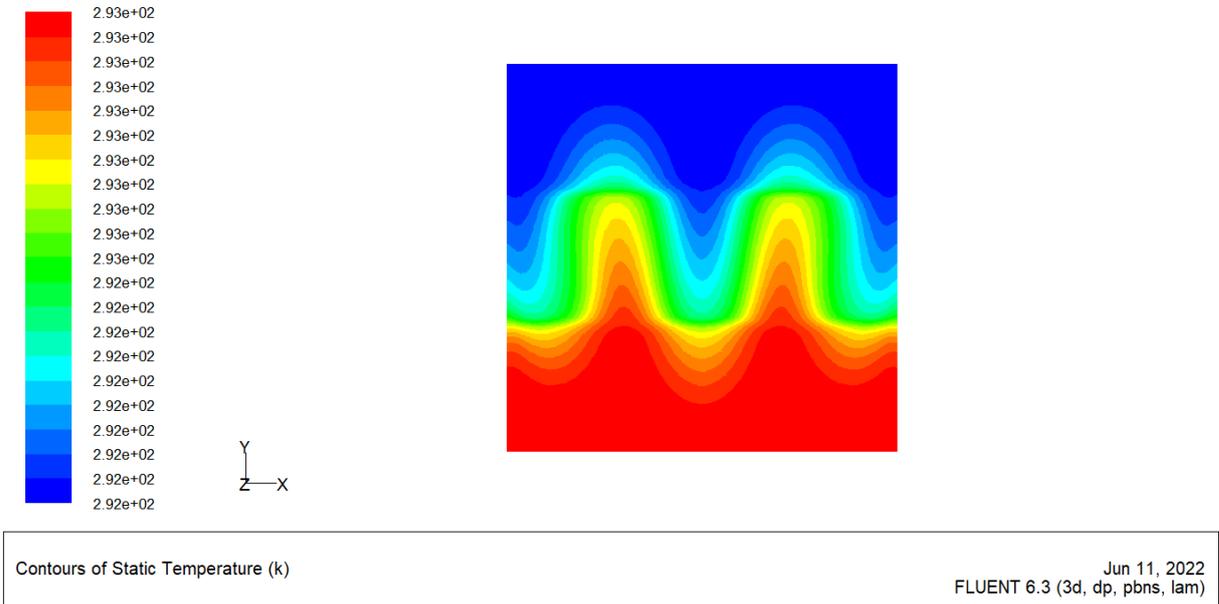


Figure III. 12: Champs de température pour l'huile silicone de référence. Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.

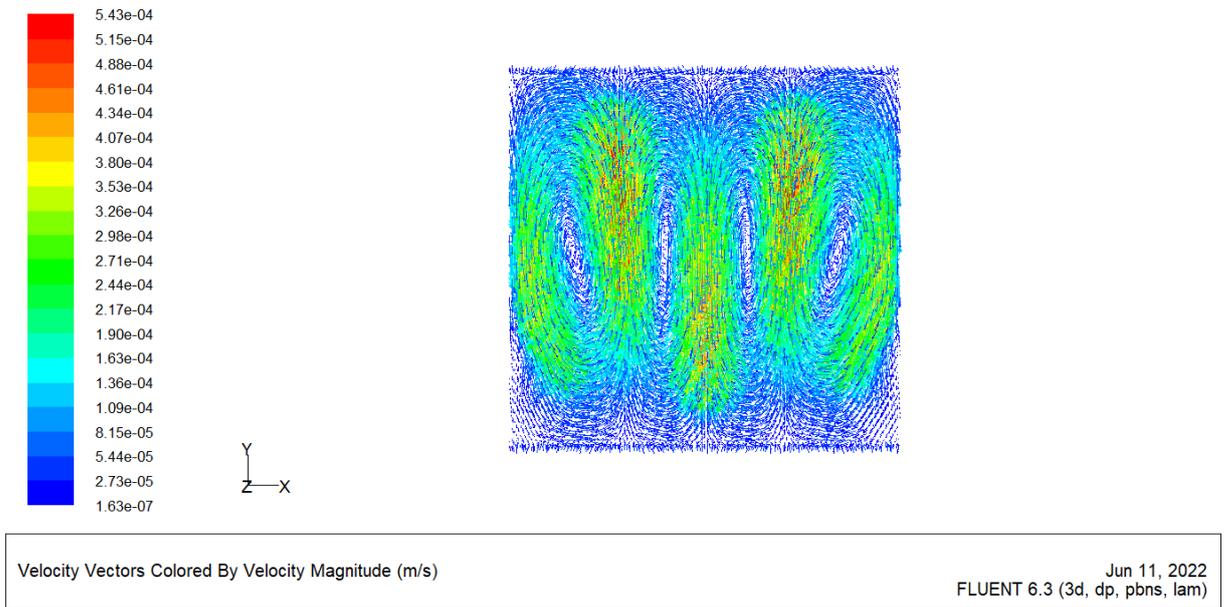


Figure III. 13: Champs de vitesse pour l'huile silicone de référence. Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.

III-4-2- Huile minérale (fluide A)

Dans les figures suivantes, nous présentons les champs de vitesse et de température avec Huile minéral (fluide A) comme fluide convective.

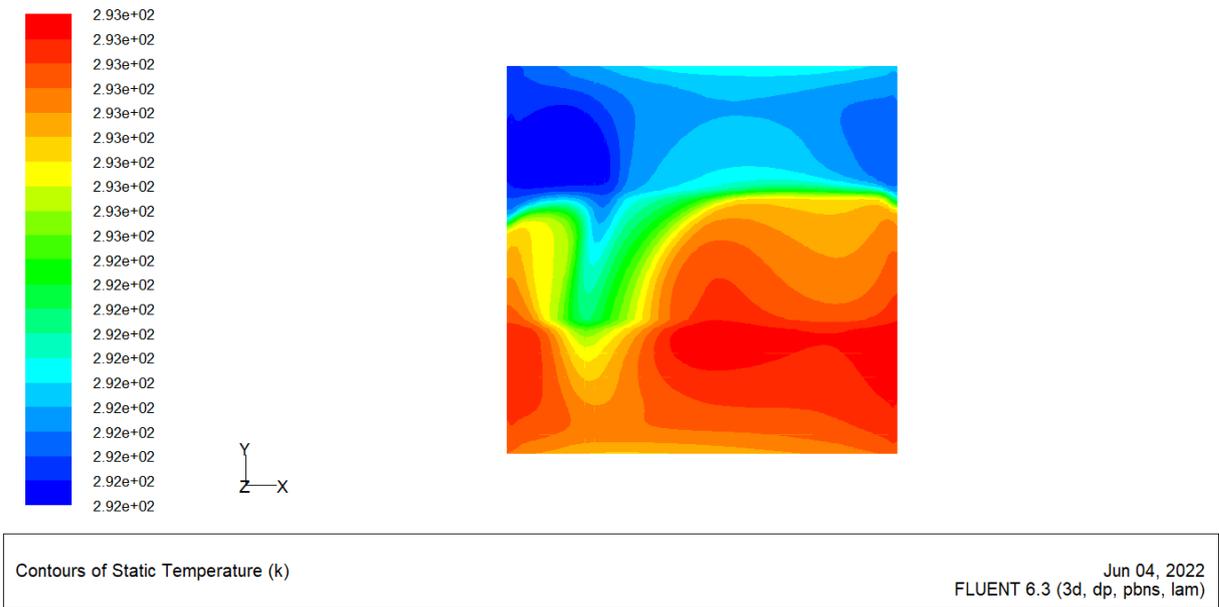


Figure III. 14: Champs de température pour huile minérale (fluide A). Cavity de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.

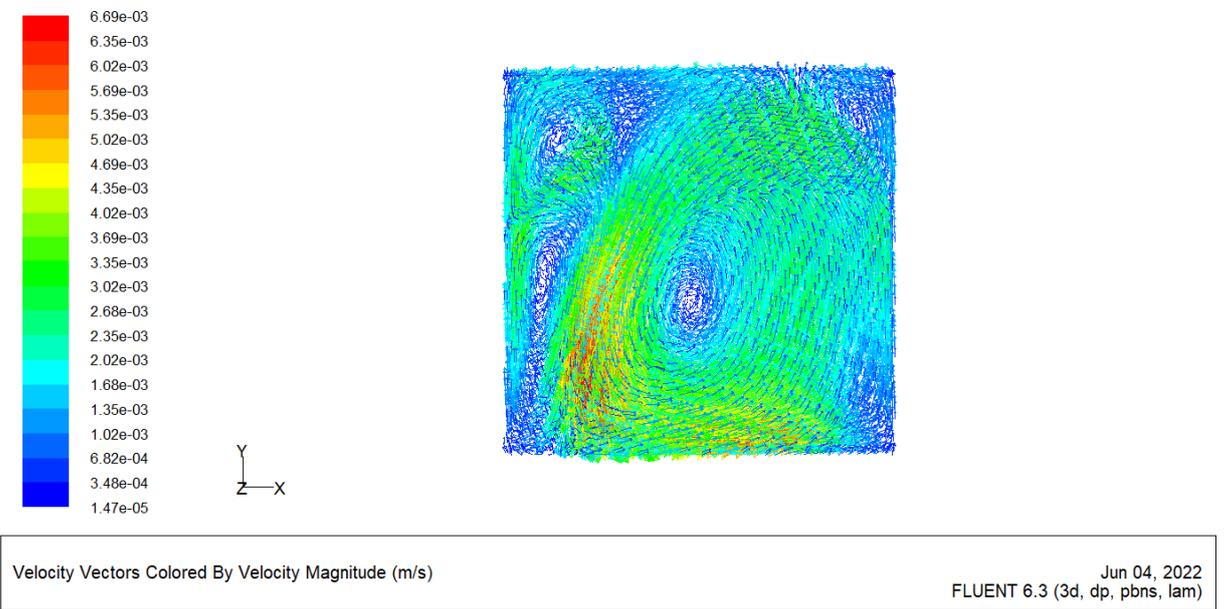


Figure III. 15: Champs de vitesse pour huile minérale (fluide A). Cavity de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.

III-4-3- Huile silicone (fluide B)

Dans les Figures suivantes, nous présentons les champs de vitesse et de température avec huile silicone (fluide B) comme fluide convective.

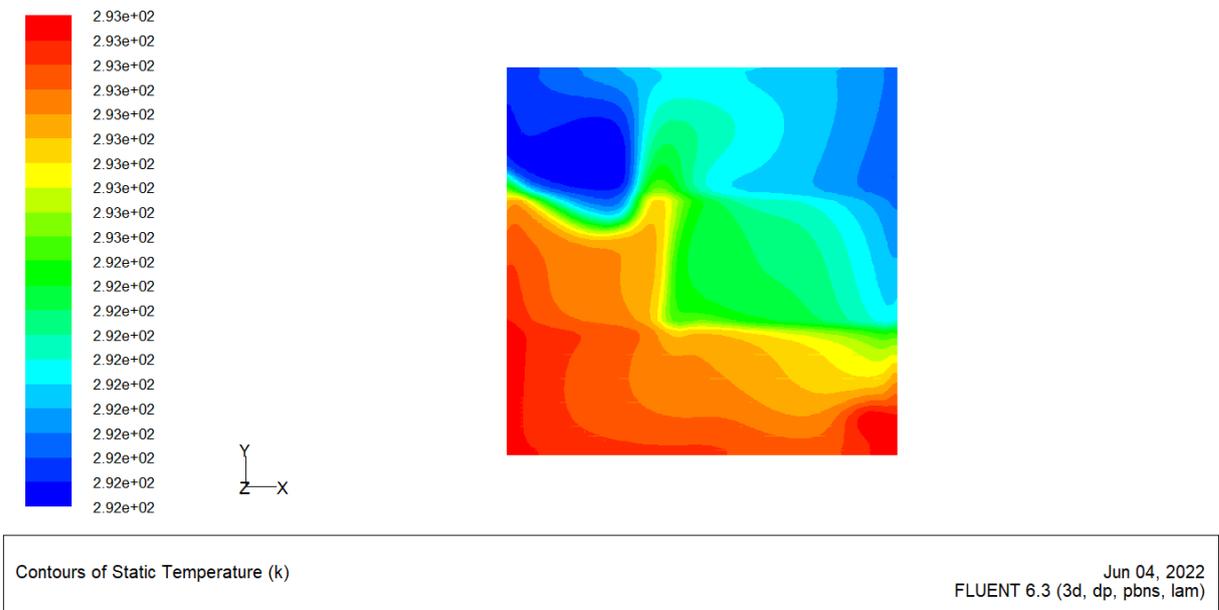


Figure III. 16: Champs de température pour huile silicone (fluide B). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.

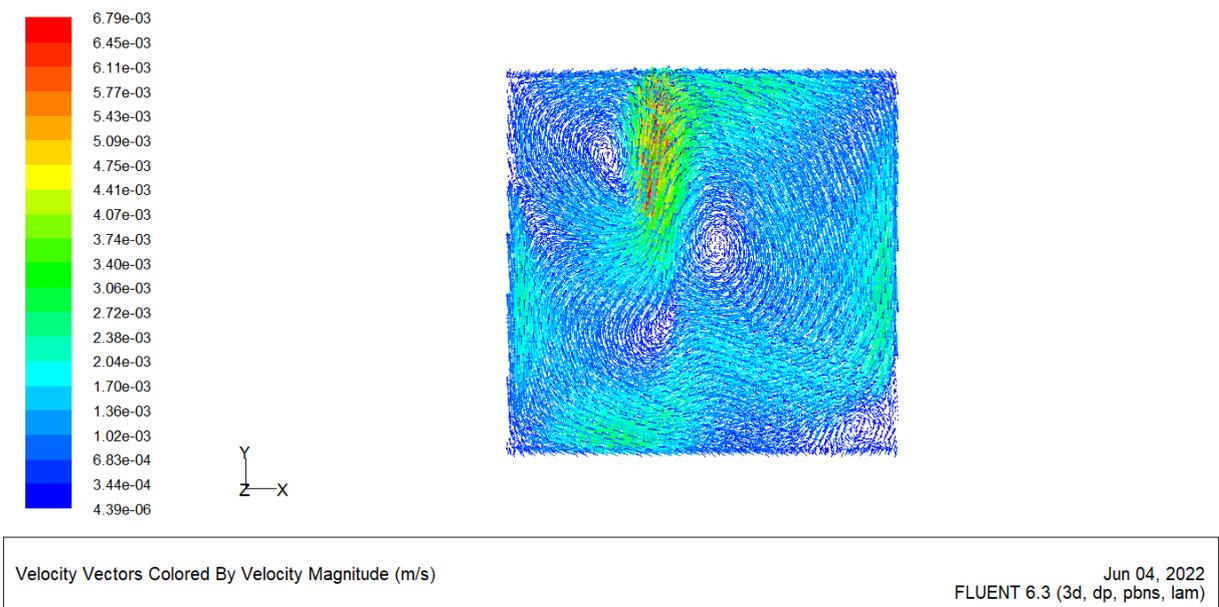


Figure III. 17: Champs de vitesse pour huile silicone (Fluide B). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T=1$ K.

III-4-4-Huile silicone (fluide C)

Dans les figures suivantes, nous présentons les champs de vitesse et de température avec huile silicone (fluide C) comme fluide convective.

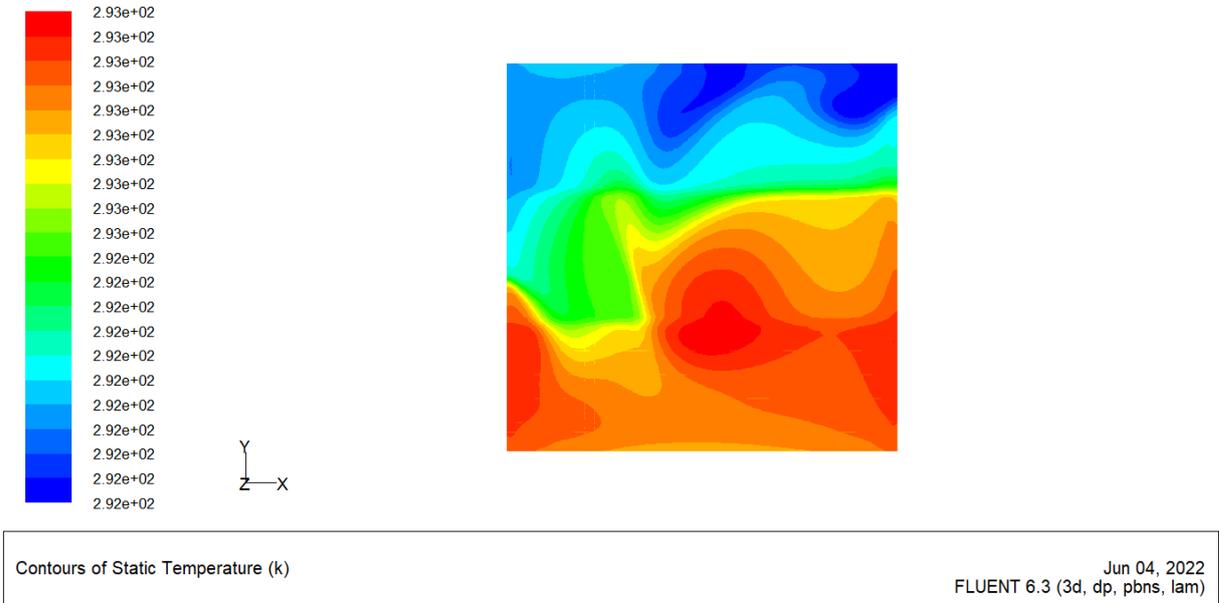


Figure III. 18: Champs de température pour huile silicone (Fluide C). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.

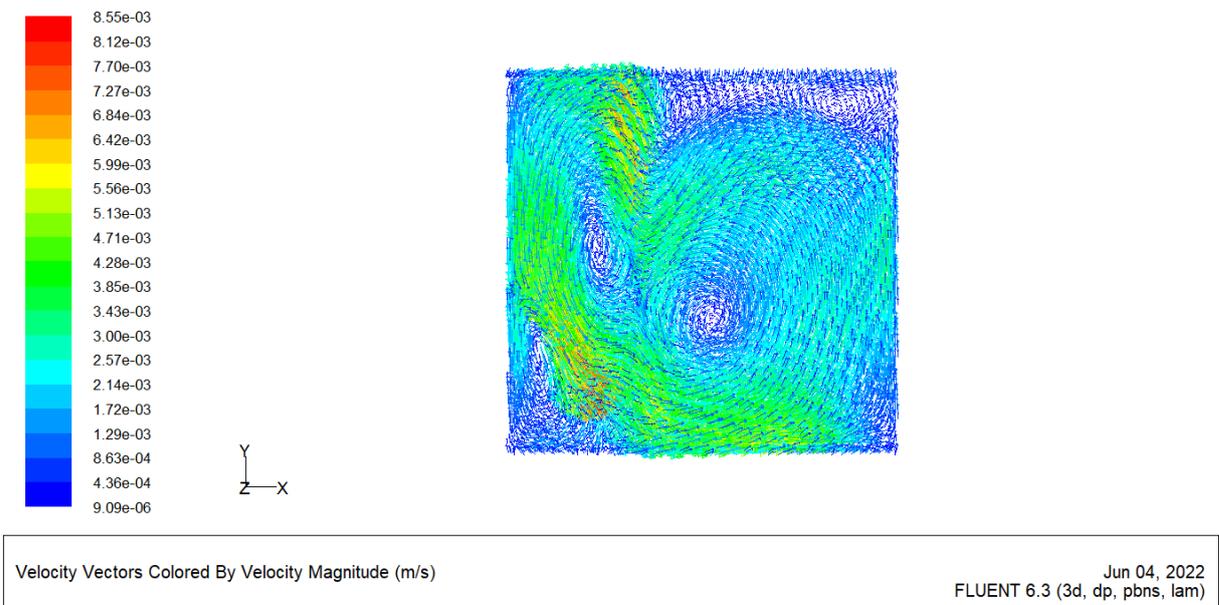


Figure III. 19: Champs de vitesse pour huile silicone (Fluide C). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T=1$ K.

III-4-5- huile Ester synthétique (fluide D)

Dans les figures suivantes, nous présentons les champs de vitesse et de température avec huile ester synthétique (fluide D) comme fluide convective.

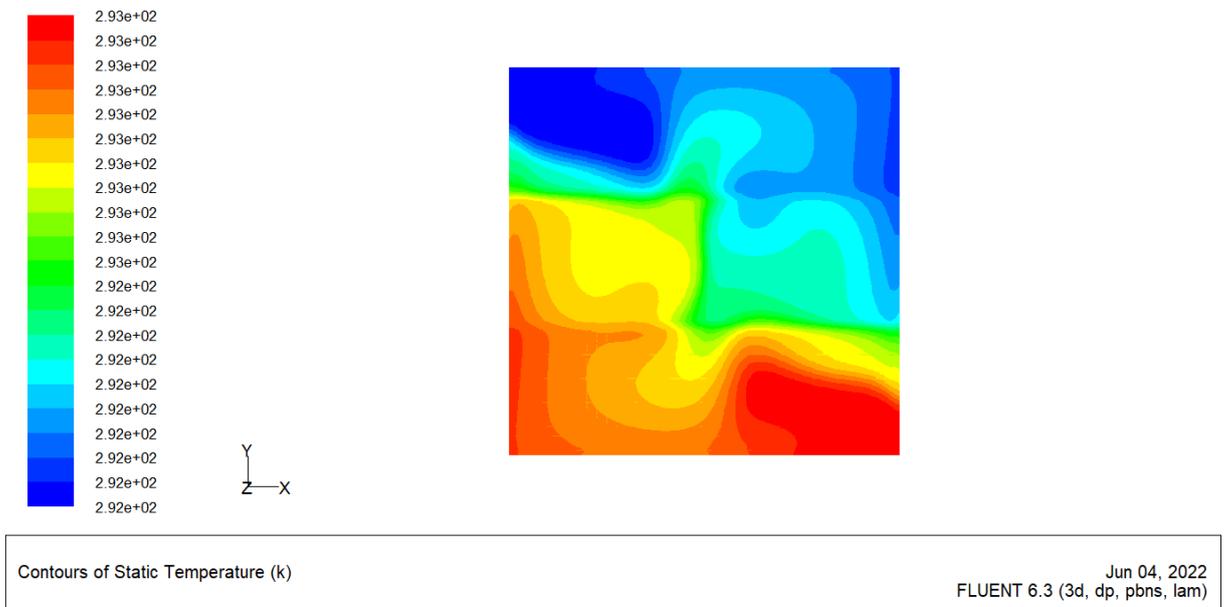


Figure III. 20: Champs de température pour huile ester synthétique (Fluide D). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.

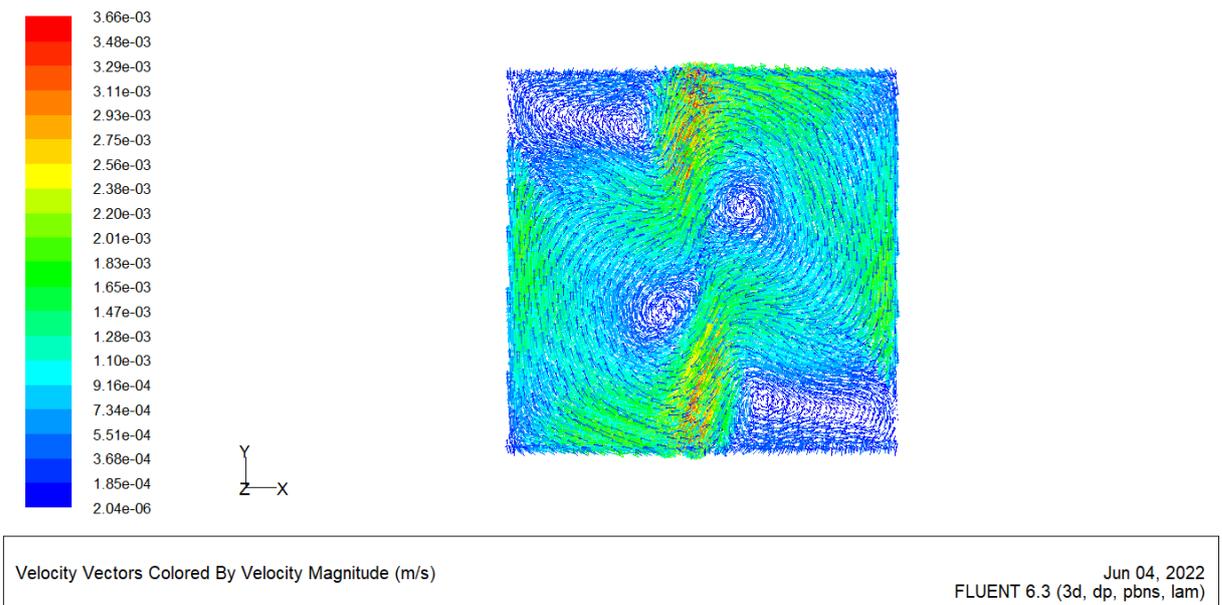


Figure III. 21: Champs de vitesse pour huile ester synthétique (Fluide D). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.

III-4-6-Huile ester naturelle (fluide E)

Dans les figures suivantes, nous présentons les champs de vitesse et de température avec huile ester naturelle (fluide E) comme fluide convective.

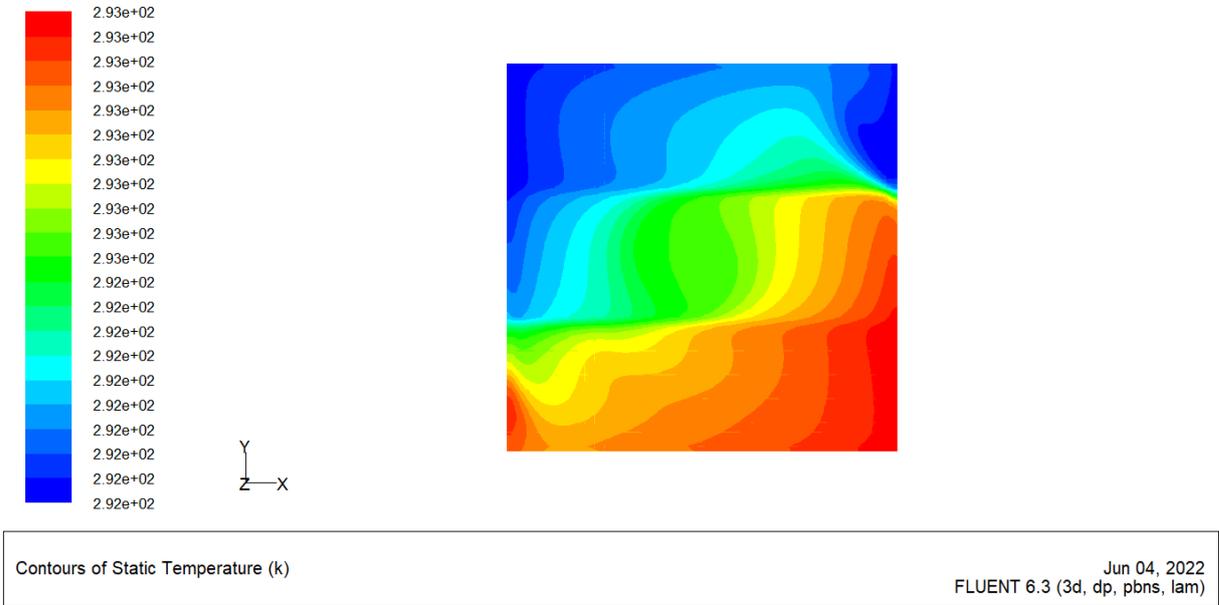


Figure III. 22: Champs de température pour huile ester naturelle (Fluide E). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.

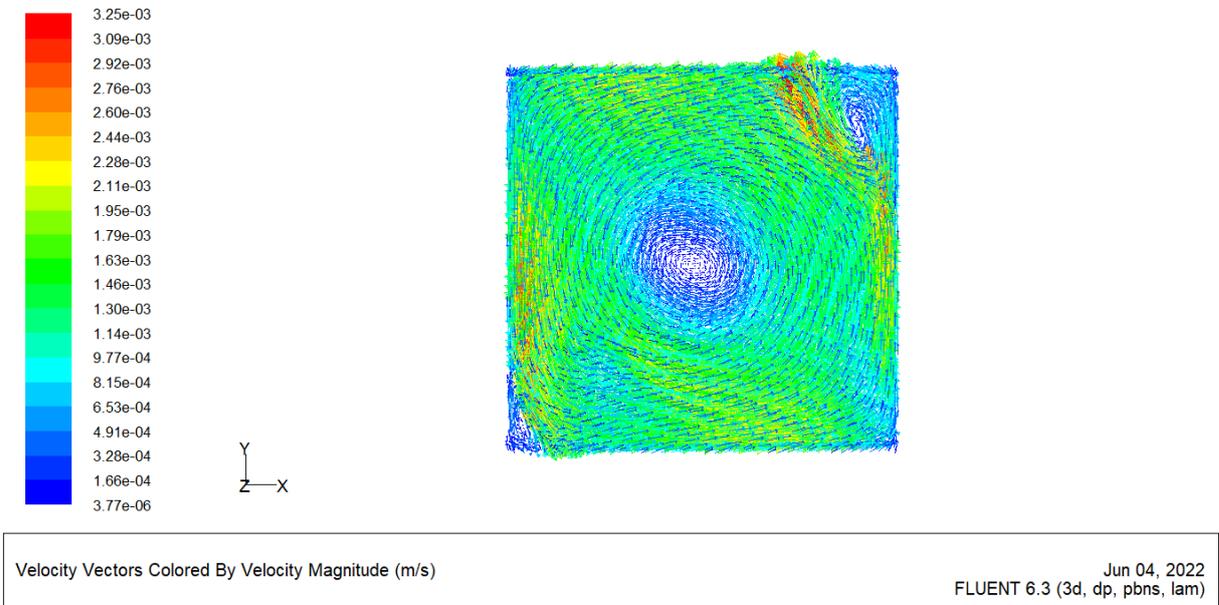


Figure III. 23: Champs de vitesse pour huile ester naturelle (Fluide E). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K

III-4-7-Huile ester naturelle (fluide F)

Dans les figures suivantes, nous présentons les champs de vitesse et de température avec huile ester naturelle (fluide F) comme fluide convective.

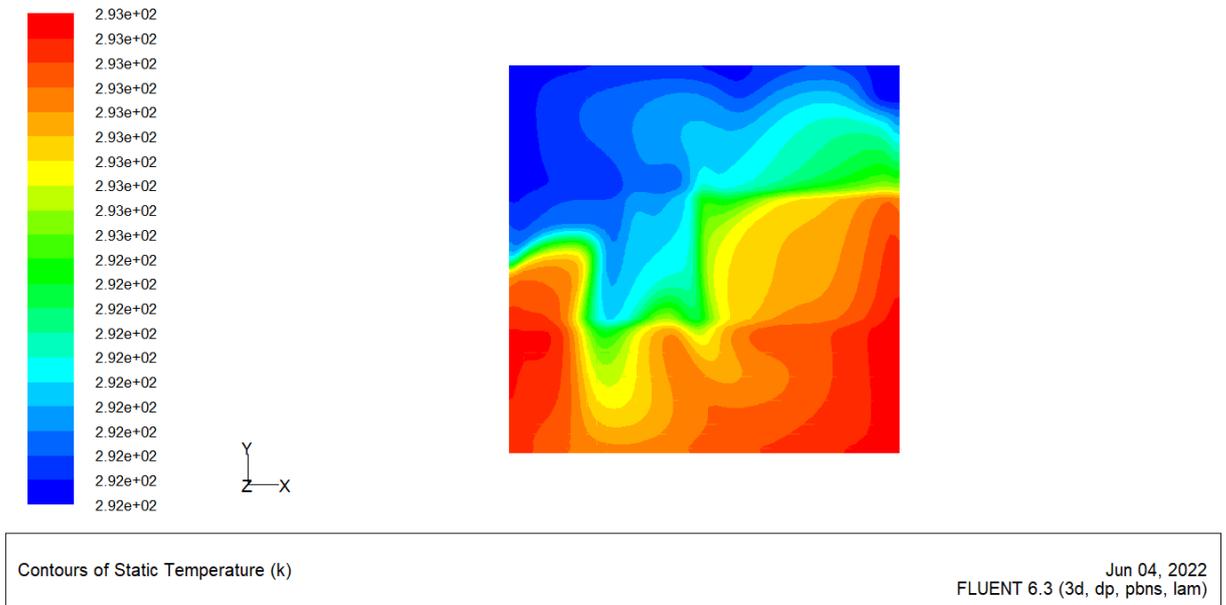


Figure III. 24: Champs de température pour huile ester naturelle (Fluide F). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.

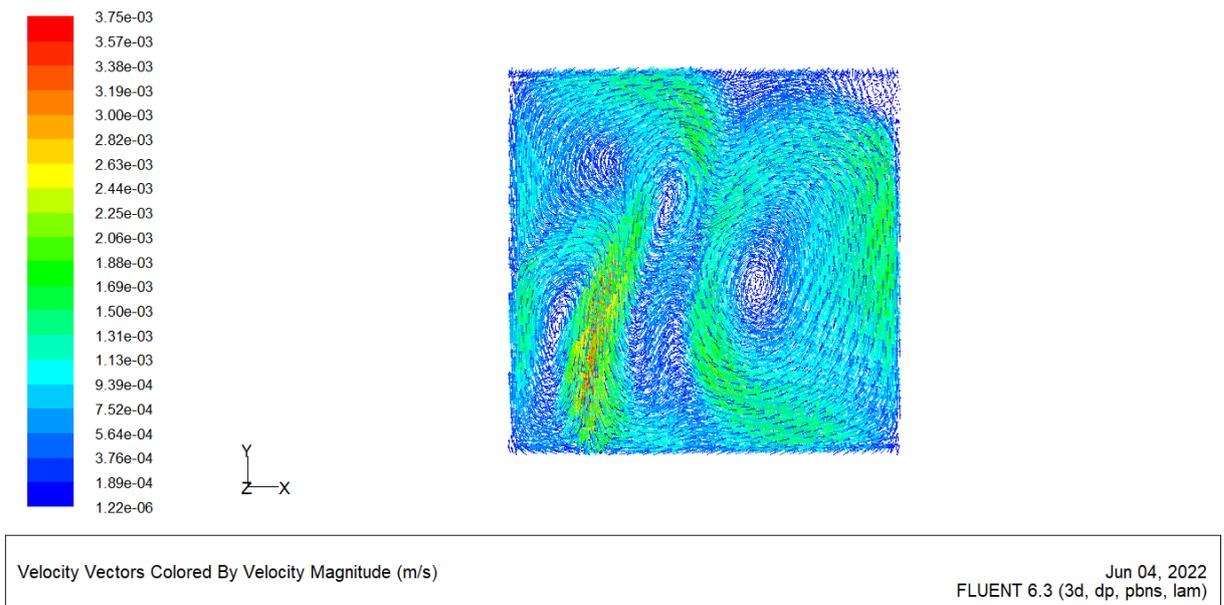


Figure III. 25: Champs de vitesse pour huile ester naturelle (Fluide F). Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm)

Le tableau (III-1) représente des valeurs comparatives de différents fluides (huile silicone, Fluide A, Fluide B, Fluide C, Fluide D, Fluide E et Fluide F) pour les mêmes dimensions de la cavité et la même différence de température appliquée.

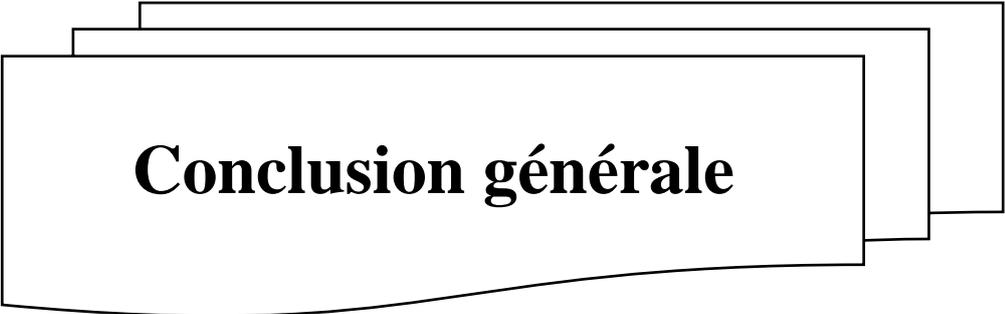
Tableau III. 1: Nombre de Nusselt et densité de flux totale pour différents fluides. Cavité de dimensions (100 mm*100 mm*5 mm) et $\Delta T = 1$ K.

	Huile silicone de référence	Huile minérale	Huile silicone		Huile ester synthétique	Huile ester naturelle	
Fluide	Huile Silicone [25]	Fluide A	Fluide B	Fluide C	Fluide D	Fluide E	Fluide F
Ra	1.95×10^5	7.11×10^5	2.14×10^5	5.58×10^5	2.18×10^5	1.60×10^5	1.37×10^5
Pr	212	285.7	518.4	224.34	886.4	809.1	1071.92
Nu	7.1995	10.5338	9.5284	8.8704	9.6822	9.3802	10.4135
$\Phi t(W/m^2)$	31.53736	40.22	43.60	40.32	42.25	47.47	50.49

D'après les résultats présentés dans le tableau (III-1), On peut remarquer que l'huile ester naturelle (Fluide F) permet d'avoir la plus grande densité de flux totale suivi par l'huile ester naturelle (Fluide E), l'huile silicone (Fluide B), l'huile ester synthétique (Fluide D), l'huile silicone (Fluide C), l'huile minérale (Fluide A) alors que l'huile silicone de référence est le fluide pour lequel la densité de flux totale est la plus petite. La valeur de Nusselt moyens est proportionnelle avec le nombre de Prandtl et le nombre de Rayleigh également.

III-5- Conclusion :

En utilisant le code CFD « FLUENT », basé sur la méthode des volumes finis, on a pu déterminer les champs thermique et dynamique ainsi que les variations des densités de flux thermique et les nombres de Nusselt moyens dans le but de caractériser les taux de transfert de chaleur à l'intérieur de la cavité et de trouver le meilleur fluide de convection qui permet un bon refroidissement.



Conclusion générale

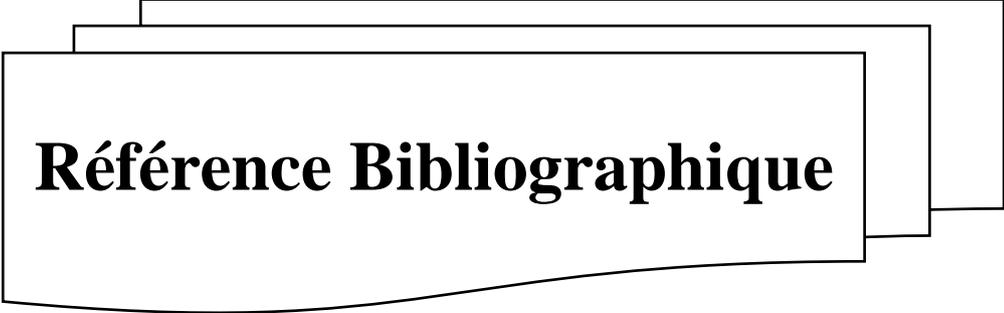
Conclusion générale

Le refroidissement des composants électroniques reste un sujet d'actualité, beaucoup de travaux ont été réalisés sur ce sujet. Dans l'étude présentée dans ce mémoire, on a présenté une étude numérique sur le refroidissement des composants électroniques. Un premier travail de validation a été réalisé en comparant nos résultats avec d'autres travaux. Pour montrer l'influence de la nature du fluide sur les écoulements convectifs on a utilisé différents fluides : huile silicone (fluides B et C), huile minérale (fluide A), huile ester naturelle (fluides E et F) et huile ester synthétique (fluide D) pour les mêmes dimensions de la cavité et la même différence de température appliquée.

Après la création de la géométrie, le maillage et les conditions aux limites par le code CFD « ANSYS-FLUENT », basé sur la méthode des volumes finis, on a pu déterminer les champs thermique et dynamique ainsi que les variations des densités de flux thermique et les nombres de Nusselt moyens dans le but de caractériser les taux de transfert de chaleur à l'intérieur de la cavité et de trouver le meilleur fluide convectif qui permet un bon refroidissement des composants électroniques.

Les résultats obtenus montrent que :

- 1- L'huile ester naturelle (Fluide F) permet d'avoir la plus grande densité de flux totale suivi par l'huile ester naturelle (Fluide E), l'huile silicone (Fluide B), huile ester synthétique (Fluide D), l'huile silicone (Fluide C) et l'huile minérale (Fluide A) alors que l'huile silicone de référence est le fluide pour lequel la densité de flux totale est la plus petite.
- 2- La valeur de Nusselt moyen est proportionnelle avec le nombre de Prandtl et avec le nombre de Rayleigh également.



Référence Bibliographique

Référence bibliographique

- [1] **Saâd ZOUTENE**, Étude numérique et expérimentale du refroidissement des convertisseurs auxiliaires de puissance dans les trains par convection naturelle, film liquide et caloduc, Thèse de doctorat en Énergétique 'Université de VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS Le 06/06/2014, à VALENCIENNES
- [2] **A Bennia, S Rahal**, la convection naturelle dans une cavité simulant un thermosiphon, Editions, *Universitaires Européennes, Saarbrücken(Allemagne)*, p.1-124, (2014).
- [3] **Jean Tain, Franck Enguehard, Estell lacona**, Transfert thermique, Introduction aux transfert d'énergie, 2014.
- [4] **J-Philippe Pérez et A. M. Romulus**, Thermodynamique fondements et applications, Paris, Masson (1993).
- [5] **KHIDER fatma Zohra**, Amélioration de la convection mixte en utilisant des ailettes cylindriques avec des ouvertures au niveau de la base, mémoire de master université de M'sila, 2016
- [6] **ABDEDDAIM Amel**, Gestion des échanges thermiques des éléments électronique, mémoire de master université Biskra 2019
- [7] **Zhongda ZHANG**, Gestion thermique des composants d'électronique de puissance -Utilisation du diamant CVD, Thèse en vue d'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, 2012.
- [8] **M. Chaour**, Interaction des structures tourbillonnaires avec la couche limite dans une cavité différentiellement chauffée, mémoire de magister, université Mentouri-Constantine (2010).
- [9] **A.BENNIA**, cours transfert thermique, université Mohamed el Bachir Ibrahimi bordj Bou Arreridj (2013 /2014)
- [10] https://www.researchgate.net/figure/Schema-simplifie-dun-moteur-a-combustion-interne-a-allumage-commande-suralimente-Le_fig37_321777790

[11] Coefficient de transfert thermique par convection, sur le site : http://help.solidworks.com/2016/french/solidworks/cworks/c_Convection.htm.

[12]https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/Ouvrages/livre%2520Padet/PTC%252009%2520-%2520Chapitre%25205.pdf&ved=2ahUKEwixwbu_saX2AhWck_0HHd3SAHUQFnoECAQQAQ&usq=A0vVaw1y0azw_GRscI-LQIaBrqIE.

[13] **Seddik bouchouicha malika**, Étude des instabilités thermo-convective dans une enceinte différentiellement chauffée munie d'une ailette conductrice et adiabatique, thèse de doctorat en sciences, université de Mohamed Boudiaf Oran.

[14]<https://lesdefinitions.fr/composants#:~:text=Un%20composant%20%C3%A9lectronique%20est%20un,des%20soudures%20au%20circuit%20imprim%C3%A9>

[15] **Adel HAMOUC**, Refroidissement à air des composants électroniques par convection mixte, mémoire de magister de l'université de Frères Mentouri Constantine, 2007.

[16]<https://www.electrolube.fr/articles-techniques/gestion-thermique-des-appareils>
électroniques/ (consulté 09/04/2019).

[17] **AREELIS Technologies** : dissipation thermique dans les composantes électroniques ; un enjeu pour la fiabilité des composant/système électroniques quelles solution technologiques. Laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg, 2015.

[18] **Moualek Imane et Zerguine Belqassim** Simulation numérique de la convection mixte dans une nouvelle conception de dissipateur de chaleur rotatif utilisé pour le refroidissement d'un CPU mémoire de master université de Mohamed Boudiaf M'sila, 2019.

[19] **AREELIS Technologies** :(Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg), dissipation thermique dans les composantes électroniques ; un enjeu pour la fiabilité des composant/système électroniques quelles solutions technologiques. Laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg, 2015

[20] **Hasna Louahlia** (Lusac), **Sebastien You** (Areelis technologies), Dissipation thermique dans les composants/systèmes électroniques, Areelis technologies, Lusac (laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg), 2015.

[21] **Frank Fan**, "Electronics packaging simplified radiation heat transfer analysis method with Thermal and Thermo mechanical Phenomena in Electronic Systems", 2004. SEMITHERM '04. The Ninth Inter society Conférence, 2004.

[22] **M.tawk**, "étude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique", L'UNIVERSITE DE GRENOBLE, GRENOBLE.2006.

[23] **Zhongda ZHANG**, Gestion thermique des composants d'électronique de puissance -Utilisation du diamant CVD, Thèse en vue d'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, 2012.

[24] Stephen A. Solovitz, M.E.L.D.S., Advanced Technology Leader, Ener, Micro channels Take Heat sinks to the Next Level, November 2006, Power Electronic Technology: Power Electronic Technology November 2006. p. 14-20.

[25] "What Does the Future of Thermal Management Hold for Electronics?" (<http://www.me.umn.edu/divisions/tht/tme/tme4.html>).

[26] **Mansour TAWK**, Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide électrique, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble.2011

[27] **R Hopkins, A Faghri, and D Khrustalev**, « Flat miniature heat pipes with micro capillary groove», Journal of Heat Transfers, Vol. 121, pp. 102-109, (1999)

[28] **Y Cao, M Gao, J.E Beam, and B Donovan**, Experiments and Analyses of Flat Miniature Heat Pipes, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 11, pp. 158-164, (1997).

[29] **J. Sabau**, Determination of solid suspensions in electrical insulating oils by turbidimetry, in *SAIT/CEA Technology Symposium, Calgary (Alberta)*, 1998, pp. 11-12

- [30] **K. S. KASSI**, Étude de l'impact du vieillissement des huiles minérales et alternatives sur le refroidissement des transformateurs de puissance : Approches numériques et expérimentales, Chicoutimi, Canada: thèse de doctorat, 2019.
- [31] <http://joho.monsite.orange.fr/> LUBRIFICATION : LES HUILES P1
- [32] **SEO YOUNG** et **AL.** Forced Convection Heat Transfer From Two Heated Blocks in Pulsating Channel Flow. *International Journal Heat and Mass Transfer* 1998; 41, 625-634.
- [33] **S.S. HSIEH, D.Y. HUANG.** Numerical Computation of Laminar Separated Forced Convection on Surfaced-Mounted Ribs 1987.
- [34] **Y.L. Tsay and J.C. Cheng**, Analysis of Convective Heat Transfer Characteristics for a Channel Containing Short Multi-Boards Mounted with Heat Generating Blocks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007.
- [35] **C. Benseghir**, étude de la convection naturelle dans une cavité ayant une paroi ailetée, mémoire magister, université de Batna (2008).
- [36] **G. de Vahl Davis**, Natural convection of air in a square cavity, a bench mark solution. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 3, pp. 249-264 (1983)
- [37] Conférence internationale sur l'énergie verte et l'ingénierie environnementale (GEEE-2017). *Journal internationale de la recherche scientifique et des technologies d'ingénierie IJSET* Vol.5 pp1-4
- [38] Refroidissement par convection naturelle des composants électroniques montés sur une paroi verticale *Sciences & Technologie B – N°33*, (Juin 2011), pp 41 – 52
- [39] Refroidissement par convection mixte des composants électroniques montés dans un canal horizontal, Laboratoire d'Energétique Appliquée et de Pollution, Département de Génie Mécanique, Université Mentouri-Constantine, Route de Ain El. Bey, Constantine 25000, Algérie PP 1-6.
- [40] **Wang, Q. et Jaluria, Y. (2004).** Three dimensional conjugate Heat Transfer in a horizontal channel with discrete heating, *ASME Journal of Heat Transfer*, vol 126: pp. 642 -647.

- [41] **Bhowmik, H., Tso, C., Tou, K., Tan, F. (2005).** Convection heat transfer from discrete heat sources in a liquid cooled rectangular channel, *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, pp. 2532-2542.
- [42] **T. Furukawa, W-J Yang. (2003)** Thermal fluid flow in parallel boards with heat generating blocs, *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol 46 pp 5005-5015.
- [43] **Boutina, L, Bessaïh, R. (2011)** Numerical simulation of mixed convection air-cooling of electronic components mounted in an inclined channel, *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 2052 – 2062.
- [44] **Kim, S. H, Anand, N.K. (2000):** Use of slots to enhance forced convective cooling between channels with surface-mounted heat sources *Numerical Heat Transfer, Part A*, vol. 38, pp. 1-21.
- [45]] **I. Ishihara *, T. Fukui, R. Matsumoto,** Natural convection in a vertical rectangular enclosure with symmetrically localized heating and cooling zones, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.23, pp. 366–372 (2002).
- [46] **Help Fluent (6.3.26).**
- [47] **M. Hasnaoui, E. Bilgen, P. Vasseour,** Natural convection heat transfer in rectangular cavities partially heated from below, *J. Thermophys. Heat Transfer*, Vol. 6, pp. 255-264 (1992).
- [48] **B. Baudouy,** étude thermo-hydraulique d'un thermosiphon en hélium diphasique et en configuration horizontale, Laboratoire de Cryogénie et Station d'Essai, Stage réalisé du 05/07/2010 au 19/12/2010, CEA Saclay.
- [49] **N. Belghoul,** Modélisation et simulation de la convection due à un champ de force externe dans des cavités : Convection Naturelle, MHD et Marangoni, mémoire de master.